



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**Kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyyssanturin käyttö ja
standardisointi kunnonvalvonnan
värähtelymittauksissa**

Arto Tuomi

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö

Joulukuu 2020

TIIVISTELMÄ

Kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin käyttö ja standardisointi kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa

Arto Tuomi

Oulun yliopisto, konetekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2020, 107 s. + 2 liitettä

Työn ohjaajat yliopistolla: Jouni Laurila & Konsta Karioja

Mikroelektromekaanisten järjestelmien (micro-electro-mechanical systems, MEMS) valmistustekniikan kehitys ja teollisen esineiden internetin (industrial internet of things, IIoT) yleistyminen ovat lisänneet kiinnostusta langattomia kapasitiivisia MEMS-kiihtyvyysantureita kohtaan kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa. Diplomityön tavoitteena oli selvittää kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden erot tavanomaisesti teollisuudessa käytössä oleviin pietsosähköisiin kiihtyvyysantureihin verrattuna. Näiden anturityyppien rakennetta, tiedonsiirtoa, virrankulutusta ja toimintaa vertailtiin keskenään.

Anturityyppien etuja ja puutteita tarkasteltiin kunnonvalvonnan värähtelymittauksien kannalta. Työn tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvin kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden suorituskky vastaa kunnonvalvonnan värähtelymittauksia käsittelevien PSK-standardien asettamia vaatimuksia. Viimeiseksi selvitettiin ne aihealueet, joihin MEMS-anturiteknologian käyttöönotto kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa luo tarpeita uusien standardien luomiselle tai nykyisten standardien muuttamiselle.

Työ suoritettiin tutkimalla kirjallisuutta sekä suorittamalla testimittauksia molemmille anturityypeille. Testimittaukset sisälsivät värähtely- ja kohinasomittauksia. Värähtelymittaukset suoritettiin tärhistimen avulla laajalla taajuusalueella sekä eri amplitudeilla. Työn pääpaino oli kirjallisuuskatsauksessa, koska testimittauksia ei pystytty toteuttamaan halutussa laajuudessa.

Tutkimuksen tulokset viittaavat siihen, että monet värähtelymittauksiin suunnitellut kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit täyttävät suorituskyvyltään osan värähtelymittauksia käsittelevien PSK-standardien asettamista vaatimuksista. Monet näistä antureista eivät sovellu PSK-standardien mukaisien absoluuttisten värähtelymittausten suorittamiseen kovin suurella taajuusalueella, mutta matalataajuuksisten värähtelyjen mittaamiseen niitä voi yleensä käyttää. Monelta osin kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit kuitenkin vastaavat PSK-standardeissa kiihtyvyysantureille ja mittalaitteille asetettuihin vaatimuksiin.

Testimittauksien tulokset korostivat mittalaitteiden kalibroinnin ja testaamisen tärkeyttä. Perusteellisella kalibroinnilla ja testaamisella pyritään varmistamaan, että mittalaitteilla voidaan suorittaa luotettavia mittauksia. Kalibroinnin ja testaamisen tärkeys korostuu entisestään uuden teknologian kohdalla.

Asiasanat: kunnonvalvonta, värähtelymittaus, kapasitiivinen MEMS-kiihtyvyysanturi, standardi, pietsosähköinen kiihtyvyysanturi

ABSTRACT

Usage and standardization of capacitive MEMS accelerometer in vibration-based condition monitoring

Arto Tuomi

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Master's thesis 2020, 107 pp. + 2 Appendixes

Supervisors at the university: Jouni Laurila & Konsta Karioja

The advancements in manufacturing technologies of micro-electro-mechanical systems (MEMS), and the trending of industrial internet of things (IIoT), have grown interest in the usage of wireless capacitive MEMS accelerometers in vibration-based condition monitoring. The objective of this thesis was to determine the differences between capacitive MEMS accelerometers and piezoelectric accelerometers, latter of which are commonly used in industry. To determine the differences between the sensors, the properties of the MEMS accelerometers and the piezoelectric accelerometers were compared.

The advantages and drawbacks of the MEMS accelerometers and the piezoelectric accelerometers in vibration-based condition monitoring were examined. The goal of the thesis was to examine to what extent the capacitive MEMS accelerometers meet the requirements of vibration measurements in condition monitoring that are set in PSK standards. Finally, the need to create new standards or to modify existing standards in vibration-based condition monitoring, because of MEMS technology, were examined.

The thesis was conducted by a literature review and by carrying out test measurements for the sensors. Two types of test measurements were conducted: vibration measurements and noise floor measurements. The vibration measurements were performed with different frequencies and amplitudes using a vibrator exciter. Due to the small number of the test measurements, the focus of the thesis was on the literature review.

The study results indicate that the performance of capacitive MEMS accelerometers that are designed for vibration monitoring, partly meet the requirements of vibration measurements in condition monitoring that are set in PSK standards. In terms of the requirements set in PSK standards, capacitive MEMS accelerometers are not commonly a viable choice for vibration measurements in a wide frequency range, but they can mostly be used to measure low frequency vibration. Capacitive MEMS accelerometers usually meet the other requirements that are set for accelerometers and measurement instruments in PSK standards.

The test measurement results highlight the importance of calibrating and testing of measurement equipment. Thorough calibrating and testing of measurement equipment is required to ensure, that reliable measurements can be carried out with them. The importance of calibrating and testing of measurement equipment is even more crucial when dealing with new technology.

Keywords: condition monitoring, vibration measurements, capacitive MEMS-accelerometer, standard, piezoelectric accelerometer

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Oulun yliopiston tukisäätiön sekä PSK Standardisointiyhdistys ry:n tuella, Oulussa 20.6.2020 - 10.12.2020 välisenä aikana. Diplomityön aihe valikoitui omasta ja teollisuuden mielenkiinnosta aihetta kohtaan.

Haluan osoittaa kiitokseni PSK Standardisointiyhdistyksen stipendirahastolle ja diplomi-insinööri Jukka Koistiselle, jotka mahdollistivat tämän diplomityön tekemisen ja rahoituksen. Haluan kiittää SKF Oy Ab:n DI Petri Kurkista ja Asensiot Oy:n DI Pauli Hännistä asiantuntemuksesta ja työn tekemiseen vaadittavien laitteiden ja tietojen tarjoamisesta.

Iso kiitos kuuluu myös Oulun yliopiston DI Jouni Laurilalle ja DI Konsta Kariojalle työn ohjauksesta ja tarkastamisesta. Kiitän myös Oulun yliopistoa, joka mahdollisti testimittausten tarvikkeet sekä tilat.

Suuret kiitokset kuuluvat myös perheelleni sekä Marille tuesta ja ymmärryksestä diplomityön suhteen.

Oulu, 10.12.2020

Arto Tuomi

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	12
1.1 Työn tavoitteet ja rajaus	12
1.2 Työn rakenne.....	13
2 KUNNONVALVONNAN VÄRÄHTELYMITTAUKSET YLEISESTI	14
2.1 Kunnanvalvonnan värähtelymittausten historia.....	15
2.2 Kunnanvalvonnalla saavutettavat hyödyt	17
2.3 Värähtely ja värähtelymittaus yleisesti	20
2.4 Värähtelyn teoriaa	22
2.4.1 Jousi-massasysteemi	22
2.4.2 Harmoninen liike	25
2.5 Signaalin derivointi ja integrointi.....	26
2.6 Värähtelymittausten suorittaminen	27
2.6.1 Anturin ja mittalaitteen valinta	27
2.6.2 Anturin kiinnitys	28
2.6.3 Anturin ja mittalaitteen mittaasetusten valinta.....	30
2.7 Värähtelymittausten analysointi.....	31
2.7.1 Aikatasossa	31
2.7.2 Fourier'n muunnos.....	32
2.7.3 Ikkunointi.....	33
2.7.4 Laskostuminen	33
3 STANDARDISOINTI YLEISESTI.....	34
3.1 Mikä on standardi.....	34
3.2 Standardisoinnin tarve.....	34
3.3 Standardisoinnin hyötyjä.....	35
4 PSK STANDARDISOINTI	36
4.1 Kunnanvalvonnan värähtelymittauksia käsittelevät PSK-standardit	36
5 PIETSOSÄHKÖINEN KIIHTYVYYSANTURI	39
5.1 Pietzosähköisen kiihtyvyyssanturin rakenne	40

5.2	Pietsosähköisen tuntoelimen materiaali	41
5.3	Pietsosähköisen kiihtyvyysanturin toimintaperiaate	42
5.4	Pietsosähköisen kiihtyvyysanturin sähköteho ja tiedonsiirto kaapeleilla	43
6	KAPASITIIVINEN MEMS-KIIHTYVYYSANTURI.....	45
6.1	Kapasitiivisen kiihtyvyysanturin toimintaperiaate.....	45
6.2	Kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin rakenne	46
6.3	Kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin langaton tiedonsiirto ja sähköteho	51
7	KIIHTYVYYSANTUREIDEN OMINAISUUKSIA	53
7.1	Koko ja paino	53
7.2	Erottelukyky (resoluutio)	53
7.3	Mittaustarkkuus (mittausepävarmuus)	54
7.4	Herkkyys	54
7.5	Taajuusvaste	55
7.6	Lineaarinen taajuusalue.....	56
7.7	Anturin vasteen lämpötilariippuvuus	56
7.8	Dynaaminen mittausalue	57
8	TESTIMITTAUKSET	58
8.1	Mittauksissa käytetyt anturit	58
8.2	Mittausjärjestelyt.....	59
8.2.1	Värähtelymittaukset.....	59
8.2.2	Kohinasomittaukset	61
8.3	Testimittausten suorittaminen ja mittausjärjestelyiden välinen vertailu	63
8.4	RuuviTag-anturin testimittausten analysointi	65
8.5	CMSS 726-kiihtyvyysanturin testimittausten analysointi.....	67
8.6	Värähtelymittausten tulokset.....	69
8.6.1	Aikatasosignaalin tehollisarvot ja taajuusspektrin pistetaajuudet	70
8.6.2	Antureiden herkkyydet	73
8.6.3	Antureiden taajuusvastekuvaajat	74
8.6.4	Taajuusspektrit.....	75
8.7	Kohinasomittausten tulokset	81
8.8	RuuviTagin avulla mitatun signaalin tarkastelu.....	85
9	KIIHTYVYYSANTUREIDEN EROT	89
9.1	Kirjallisuuden perusteella.....	89
9.2	Testimittausten perusteella	93
10	JOHTOPÄÄTÖKSET	95
10.1	Kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin suorituskyky	95

10.2 MEMS-anturiteknologian vaikutus kunnonvalvonnan värähtelymittausten standardeihin.....	96
11 YHTEENVETO	98
LÄHDELUETTELO.....	101
LIITEET:	
Liite 1. SKF CMSS 726 datalehtinen	
Liite 2. RuuviTagin värähtelydatan muokkaamiseen käytetyt ”etsi ja korvaa” -komennot	

MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	pinta-ala
a	kiihtyvyys
C	kondensaattorin kapasitanssi
c	viskoosivaimennuskerroin
d	staattisen elektrodin ja seismisen massan laattojen tai levyjen välimatka toisistaan
E_{EU}	heräte
F	voima
F_j	jousivoima
F_m	massan hitausvoima
F_v	vaimennusvoima
k	jousivakio
m	massa
q	johtimen sähkövaraus
R_T	mittausketjun vaste
S	kiihtyvyysanturin herkkyys
$S_{\%}$	kiihtyvyysanturin herkkyys poikkeama
S_f	kiihtyvyysanturin herkkyys vertailtavan taajuuden kohdalla
S_{f_R}	kiihtyvyysanturin herkkyys referenssitaajuudella
S_{RT}	kiihtyvyysanturin herkkyys huoneenlämpötilassa
S_{Ref}	vertailuanturin herkkyys
T	jakso
TR	lämpötilan aiheuttama herkkyys poikkeama
t	aika
V	jännite
V_n	laatan tai levyn ja elektrodin välinen lähtöjännite
V_{out}	lähtöjännite
V_s	syöttöjännite
X	amplitudi
x	siirtymä
\dot{x}	nopeus
\ddot{x}	kiihtyvyys
ΔS_T	kiihtyvyysanturin herkkyys muutos
ΔV	potentiaaliero
ε_r	suhteellinen permittiivisyys
ε_0	sähkövakio
ϕ	vaihekulma
ω	kulmataajuus
A/D	analogia-digitaali (analog-to-digital)
DFT	diskreetti Fourier'n muunnos (discrete Fourier transform)
FFT	nopea Fourier'n muunnos (fast Fourier transform)
CBM	kuntoon perustuva kunnossapito (condition-based maintenance)
IIoT	teollinen esineiden internet (industrial internet of things)
IEPE	sisäisellä elektroniikalla varustettu pietsosähköinen laite (integrated electronics piezo-electric)

MEMS	mikroelektromekaaninen järjestelmä (micro-electro-mechanical systems)
SiP	yhden kotelon sisällä on useita järjestelmäpiirejä (system-in-package)

1 JOHDANTO

Ensimmäinen mikroelettromekaaninen järjestelmä (micro-electro-mechanical systems, MEMS) keksittiin jo 1960-luvulla. MEMS-teknologian käyttömahdollisuudet olivat hyvin rajalliset useiden vuosien ajan, koska valmistusteknisistä syistä ei kyetty valmistamaan tarpeeksi suorituskykyisiä ja edullisia laitteita. Vasta 1990-luvun lopussa ja 2000-luvun alussa MEMS-teknologia kehittyi tarpeeksi, jotta siitä muodostui niin sanottu mahdollistava tekniikka useisiin eri käyttökohteisiin. Viimeaikainen mikroelettromekaanisten järjestelmien valmistustekniikan kehitys on mahdollistanut MEMS-antureiden käytön vieläkin laajemmin.

Nykyisin MEMS-teknologiaa käytetään päivittäin ainakin ajoneuvoissa, matkapuhelimeissa ja älyvaatteissa. Kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa kiinnostus MEMS-teknologiaan on kasvanut jo useiden vuosien ajan, mutta siitä huolimatta sen standardisointi on paikoin suppeaa. Diplomityön tarkoituksena on tutkia, ovatko kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit kehittyneet tarpeeksi ollakseen hyödyksi kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa.

Toinen syy diplomityön aiheen valikoitumiselle on teollisen esineiden internetin (Industrial internet of things, IIoT) kehittyminen ja yleistyminen. Yksi IIoT:n ominaispiirteistä on langaton tiedonsiirto. Kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit eivät itse siirrä tietoa langattomasti, mutta anturit soveltuvat langattomiin tiedonsiirtojärjestelmiin paremmin kuin pietsosähköiset kiihtyvyysanturit. Tämä johtuu muun muassa kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden pienestä virrankulutuksesta sekä signaalinkäsittelypiiriin ja kiihtyvyysanturin tuntoelimen integroinnin mahdollisuudesta samalle piirilevylle.

1.1 Työn tavoitteet ja rajaus

Diplomityössä tutkitaan kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden käyttöä ja standardisointia kunnonvalvonnan värähtelymittauksia käsittelevien PSK-standardien osalta. Tarkastelu suoritetaan vertailemalla MEMS-kiihtyvyysantureita yleensä teollisuudessa käytössä oleviin pietsosähköisiin kiihtyvyysantureihin. Vertailu sisältää molempien antureiden rakenteen, tiedonsiirron, toiminnan ja virrankulutuksen tarkastelua. Tämän lisäksi molempien anturityyppien edut ja puutteet kunnonvalvonnan

värähtelymittauksissa selvitetään. Työn toisena tarkoituksena on löydettyjen tulosten perusteella selvittää ne kunnonvalvonnan värähtelymittausten aihealueet, joihin MEMS-anturitekniologian käyttöönotto luo tarpeen uusien PSK-standardien luomiselle tai nykyisten PSK-standardien kehittämiseksi.

Työn tavoitteena on tutkia kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden ja IEPE-kiihtyvyysantureiden ominaisuuksia kirjallisuuden perusteella. Lisäksi anturityyppien eroja tutkitaan käytännössä suorittamalla niille testimittauksia laboratorio-oloissa. Testimittausten värähtelymittaukset suoritetaan tärinintä apuna käyttäen, jolla voidaan tutkia antureiden vastetta laajalla taajuusalueella sekä eri amplitudeilla. Viimeiseksi antureille suoritetaan testimittauksissa kohinasomittaukset.

1.2 Työn rakenne

Diplomityö on jaettu kolmeen osaan. Ensimmäisessä osassa perehdytään kunnonvalvontaan, värähtelymittauksiin ja standardisointiin yleisellä tasolla, sekä käydään kiihtyvyysantureiden tärkeimmät ominaisuudet läpi. Toisessa osassa tutustutaan pietsosähköisen kiihtyvyysanturin sekä kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin rakenteeseen, virrankulutukseen, toimintaperiaatteeseen ja tiedonsiirtoon, joiden perusteella antureita vertaillaan keskenään. Tämän lisäksi suoritetaan testimittaukset, joiden perusteella tutkitaan, miten kapasitiivinen MEMS-kiihtyvyysanturi eroaa pietsosähköisestä kiihtyvyysanturista käytännössä. Saatujen tulosten perusteella tarkastellaan kuinka hyvin kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden suorituskkyky vastaa kunnonvalvonnan värähtelymittauksia käsittelevien PSK-standardien asettamia vaatimuksia. Lopuksi pohditaan millaisen tarpeen MEMS-anturitekniologia synnyttää uusien PSK-standardien luomiselle tai jo olemassa olevien PSK-standardien muokkaamiselle.

2 KUNNONVALVONNAN VÄRÄHTELYMITTAUKSET YLEISESTI

”Mikä tahansa tekninen järjestelmä lakkaa toimimasta tarkoituksenmukaisesti jossakin vaiheessa sen käyttöikä” (Rao 1996, s. 11). Kaikkien järjestelmien ja koneiden kunto huononee muuttuvien olosuhteiden, kuten lämpötilan muutosten, iskujen, korroosion tai väsymisen vuoksi. Vikamuodot syntyvät vaihtelevilla tehoilla, kestoilla ja muutosnopeuksilla yhden tai useamman vikaantumismekanismin vaikutuksesta. Koneen kunnan heikentyessä tarpeeksi siinä ilmenee vika, vaurio tai häiriö. PSK-standardin 6201 (2011, s. 15) mukaan vika on tila, jossa kohde ei kykene suorittamaan vaadittua toimintoa täydellisesti pois lukien ehkäisevän kunnossapidon, jonkin muun suunnitellun toimenpiteen tai ulkoisten resurssien puutteesta johtuvan toimintakyvyttömyyden takia. PSK-standardin 6201 (2011, s.15) mukaan vikaantumista tai viasta voi seurata vaurio tai häiriö, joka aiheuttaa tuotannon menetyksiä ja välittömän korjaustarpeen.

Kunnonvalvonnan tarkoitus on tutkia laitoksien ja koneiden kuntoa. Sen periaatteena on aistein sekä mittalaittein kerätä, analysoida ja tehdä johtopäätökset siitä, millaisessa kunnossa tutkittava kone on. Kunnonvalvonnalla kerätyt tiedot välitetään tarvittaessa eteenpäin kunnossapidolle ja suunnittelijoille, jotka tiedon perusteella tekevät vaadittavia korjauksia koneeseen tai sen suunnitelmiin. Tällä tavoin on mahdollista vähentää elinkaaren alkupäässä tapahtuvia vikaantumisia, pidentää koneen käyttöikää, säilyttää kilpailukyky sekä lisätä koneen käyttövarmuutta ja käyttöhenkilöstön turvallisuutta. (Rao 1996, s. 52)

Standardissa PSK 5701 (2017, s. 6) kunnonvalvonta määritellään seuraavasti: ”Koneen kuntoa ilmaisevien tietojen ja datan selville saanti ja keruu”. Lisäksi standardin PSK 6201 (2011, s. 23) mukaan kunnonvalvonta määritellään seuraavasti: ”Kunnonvalvonnalla määritellään kohteen toimintakunnon nykytila ja arvioidaan sen kehittyminen mahdollisen vikaantumis-, huolto- ja korjausajankohdan määrittämiseksi”. Koneiden lisäksi kunnonvalvontaa voidaan soveltaa rakennuksiin, prosesseihin ja ihmisiin (Mills 2010, s. 1).

2.1 Kunnonvalvonnan värähtelymittausten historia

Alkujaan koneita käytettiin häiriöön asti, jonka jälkeen koneille suoritettiin kunnossapidon toimenpiteitä tai ne vaihdettiin uuteen (Randall 2011, s. 1). Tällaista koneelle suoritettua kunnossapitoa, joka suoritetaan häiriön jälkeen, kutsutaan korjaavaksi kunnossapidoksi. Korjaavalla kunnossapidolla yleensä saavutetaan koneen suurin mahdollinen käyntiaika, mutta lyhyt elinaika. Koneen häiriöt aiheuttavat pitkiä korjausaikoja, suuria korjauskustannuksia ja erilaisia turvallisuusriskejä. Lisäksi ajettaessa kone joka kerta häiriöön asti, lisääntyy katastrofaalisten häiriöiden riski, jolloin vahinkoa voi aiheutua muihin koneen osiin, koneisiin tai ihmisiin. Korjaava kunnossapito on edelleen käytössä teollisuuden ei-kriittisillä alueilla. Korjaavaa kunnossapito on käytössä alueilla, joissa koneen kunnossapito on edullista ja nopeaa, häiriöllä on minimaalinen tai olematon riski aiheuttaa vahinkoa ympäristölleen ja häiriössä olevan koneen tunnistaminen on nopeaa. (Starr 1997, s. 131; Randall 2011, s. 1-2)

Jaksotettu kunnossapito kehitettiin korjaavan kunnossapidon rinnalle häiriöiden estämiseksi. Jaksotetussa kunnossapidossa huoltotoimenpiteet suoritetaan koneille ennalta määrätyin aikavälein, esimerkiksi perustuen kalenteriaikaan, tuotantomäärään tai käyttötunteihin. Randallin (2011, s. 1-2) mukaan jaksotetun kunnossapidon toteuttaminen vähentää yleensä häiriöitä huomattavasti. Vaikka koneiden viat, vauriot ja häiriöt vähenevät, lisääntyy varaosien kulutus ja kunnossapitäjien työtuntien määrä. Näiden lisäksi koneita korjataan myös silloin, kun niissä ei ole vikoja, aiheuttaen turhien kunnossapitokustannusten lisäksi työmotivaation alenemista kunnossapidon henkilöstön keskuudessa. Jaksotetun kunnossapidon hyödyiksi voidaan katsoa kunnossapidon suunnitelmallisuus ja vikojen, vaurioiden sekä häiriöiden väheneminen. Jaksotettua kunnossapitoa käytetään teollisuudessa edelleen silloin, kun koneen tai sen osien elinikä pystytään ennustamaan suhteellisen tarkasti.

Kuntoon perustuva kunnossapito (condition-based maintenance, CBM) kehitettiin, jotta kunnossapitokuluja ja -tunteja saatiin karsittua. Jaksotetun kunnossapidon keskittyessä korjaamiseen ja koneen osien vaihtamiseen suunnitelluin jaksotuksin, kuntoon perustuva kunnossapito keskittyy kunnonvalvonnan tai tarkastustoiminnan avulla havaittujen kohteiden suunniteltuun korjaukseen (PSK 6201:2011, s. 22–23). CBM:n tarkoituksena on tutkia koneen kuntoa, koneen ollessa jatkuvassa käytössä, häiritsemättä sen toimintaa. Tavoitteena on havaita koneessa oleva vika ja suorittaa tarvittavat korjauksen ennen

häiriötä. CBM:n haittapuoleksi voidaan lukea kunnossapidon lisääntyminen, jos koneen kunto on arvioitu väärin. Tämän vuoksi CBM:n mahdollisten hyötyjen saavuttaminen vaatii ammattitaitoisen henkilökunnan. (Girdhar & Scheffer 2004, s. 3)

Kunnonvalvonta on yksi osa-alue ehkäisevässä kunnossapidossa, jossa voidaan käyttää ainetta rikkomattomia testauksia, kuten öljyanalyysejä tai värähtelymittauksia. Nykyisin lähes kaikista suurista tuotantolaitoksista löytyy jokin kunnonvalvonnan mittalaite ja kunnonvalvontaan erikoistunut henkilö (Nohynek & Lumme 2004, s. 13). Kuitenkin ennen mittalaitteiden ja mittausmenetelmien kehittymistä käytettiin vuosikymmeniä aistienvaraista kunnonvalvontaa (Mikkonen ym. 2009, s. 100).

Aistinvaraisessa kunnonvalvonnassa käytetään haju-, tunto-, kuulo- ja näköaistia, esimerkiksi kokeilemalla kädellä koneen lämpötilaa, kuuntelemalla koneesta lähteviä ääniä tai tarkkailemalla lopputuotteen laatua. Näillä tekniikoilla pystytään saamaan koneen kunnosta hyödyllistä tietoa, mutta tieto on tekijäänsä sidoksissa. Tämän lisäksi aikaisemmin saatujen mittaustulosten vertaaminen uusiin eli niin sanottu trendaaminen on haasteellista. Vaikka nykyisin käytetään erilaisia mittausmenetelmiä ja mittalaitteita, on aistinvarainen kunnonvalvonta edelleen oleellinen osa kunnonvalvontaa. (Mikkonen ym. 2009, s. 417–427)

Ensimmäiset teollisuuden kunnonvalvonnan mittausmenetelmät otettiin käyttöön 60-luvulla, ja 80-luvulta lähtien kunnonvalvontaan ryhdyttiin panostamaan yhä enemmän (Nohynek & Lumme 2004, s. 13). Ensimmäinen tietokoneeseen pohjautuva kunnonvalvontajärjestelmä kehitettiin vuonna 1983 sekä ensimmäinen ISO-standardi kunnonvalvonnasta julkaistiin vuonna 2002 (Mills 2010, s. 2).

Ennen mekaanisia tai sähköisiä mittalaitteita kunnonvalvonta suoritettiin pääasiallisesti aistihavaintojen avulla. Koneen kuntoa arvioitiin esimerkiksi kuuntelemalla tai tunnustelemalla koneen värähtelyä. Myöhemmin suunniteltiin ja kehitettiin laitteisto, joka pystyi tuottamaan samaisen värähtelyn helposti ymmärrettävään muotoon. Tämän lisäksi mittaukset oli toistettavissa eivätkä ne olleet enää sidoksissa käyttäjään. (Angelo 1987, s. 8; Mikkonen ym. 2009, s. 417-421)

Mekaaniset siirtymäanturit olivat ensimmäisiä värähtelyantureita, jotka eivät perustuneet aistinvaraiseen kunnonvalvontaan. Värähtelyn siirtymäarvot tallennettiin paperille piirturin avulla aikatasossa. Koska siirtymäanturi jouduttiin asentamaan kiinteästi

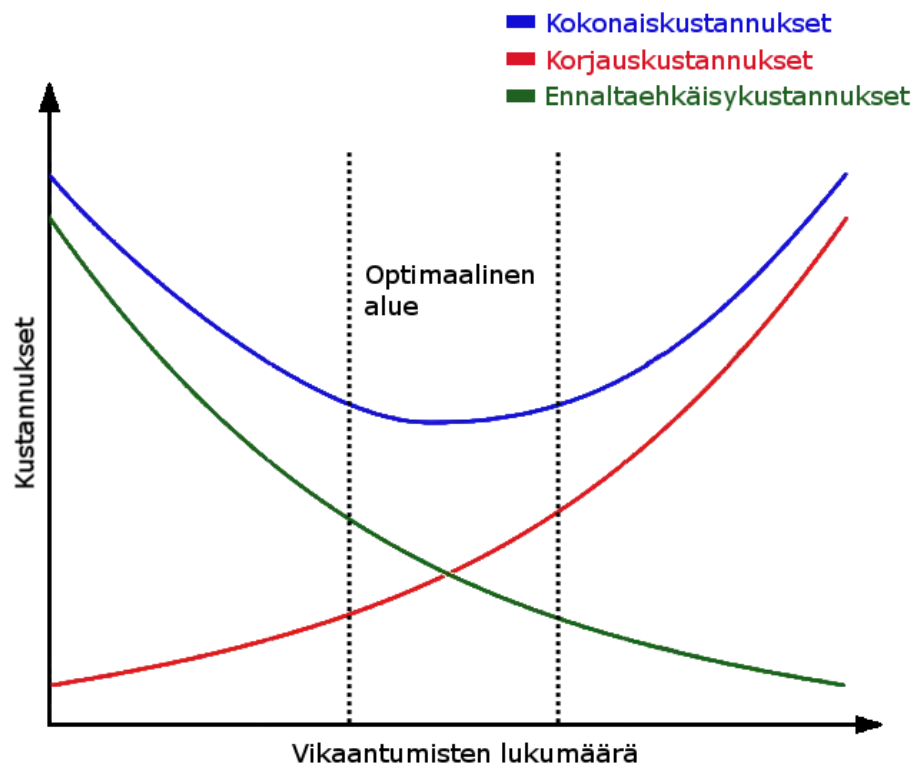
suoraan kosketukseen pyörivän kohteen kanssa, se aiheutti kuormitusta ja kulumista mitattavassa rakenteessa. Lisäksi mekaaniset siirtymäanturit toimivat vain alhaisilla taajuuksilla, vaativat suuren värähtelyamplitudin toimiakseen sekä olivat herkkiä suuntaukselle ja kulumiselle. (Mikkonen ym. 2009, s. 234)

Sähköisen värähtelyanturin keksimisen jälkeen värähtelyantureiden ei tarvinnut olla enää suorassa kontaktissa värähtelylähteeseen. Värähtelyyn verrannollinen sähköinen signaali oli mitattavissa koneen ulkopinnasta ja muutettavissa vertailukelpoiseen muotoon. Värähtelymittauslaitteiston tärkeimpänä laitteena voidaankin pitää sähköistä värähtelyanturia. Tämä johtuu sen kyvystä muuntaa mitattavan kohteen mekaaninen värähtely sähköiseen muotoon ajan funktiona. (Mikkonen ym. 2009, s. 234)

2.2 Kunnonvalvonnalla saavutettavat hyödyt

Koneiden kuntoa valvotaan, kun halutaan tietää missä kunnossa käytettävä kone on ja ennustaa sen tulevaa kuntoa (Randall 2011, s. 3). Koneen kunnon ollessa huono voidaan kunnonvalvonnan avulla yleensä päätellä, missä koneen osassa vika on ja arvioida koneen jäljellä oleva häiriötön käyntiaika. Kone, jossa on vika, voi aiheuttaa kalliita seurannaisvaurioita tai henkilövahinkoja, jotka voidaan minimoida oikein suoritettulla kunnonvalvonnalla ja kunnossapidolla (Nohynek & Lumme 2004, s. 15).

Kunnonvalvonnalla voidaan vähentää kunnossapidon kustannuksia välttämällä tarpeettomia korjauksia säästäten työtä ja varaosia. Kunnonvalvonnalla on myös mahdollista pidentää koneen elinikää, saavuttaa tuottavuuden kasvua ja vähentää suunnittelemattomien seisokkien määrää. Nämä edut ovat saavutettavissa, kun kunnonvalvontaa hyödyntäen kunnossapidon toimenpiteet voidaan ajoittaa sellaisiin ajankohtiin, että tuotannolle aiheutuu mahdollisimman vähän haittaa. Kunnonvalvonnalla pyritäänkin optimoimaan kunnossapitostrategia ja löytämään optimaalinen suhde ennaltaehkäisy- ja korjauskustannusten väliltä vähentäen kokonaiskustannuksia, kuvan 1 mukaisesti. (Nohynek & Lumme 2004, s. 11-13)



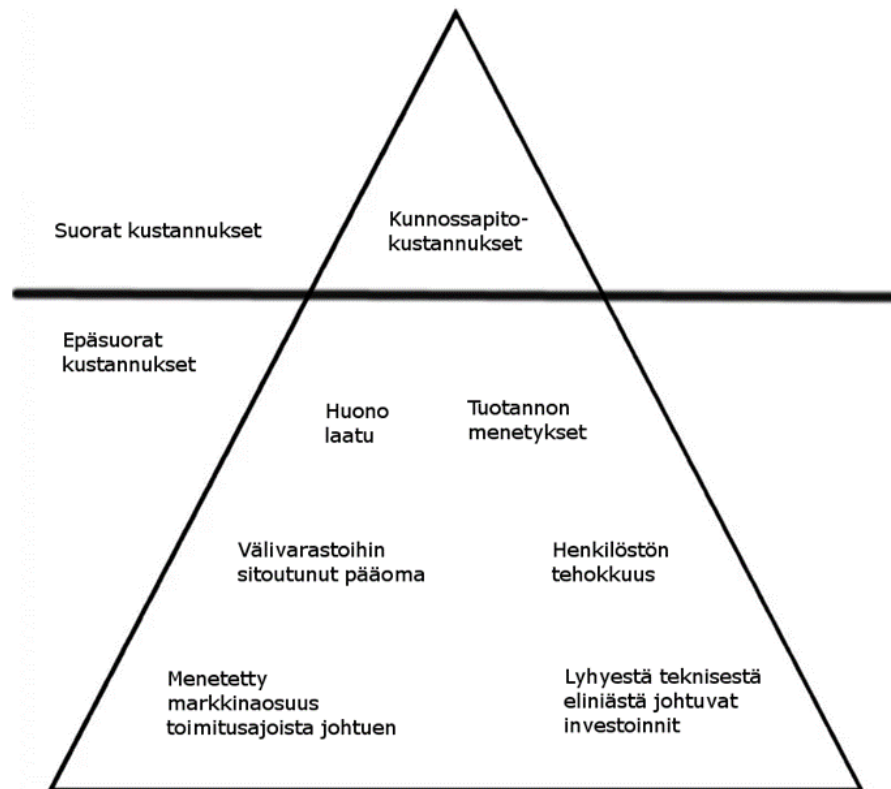
Kuva 1. Havaintokuva siitä, miten kunnossapitostrategian avulla on mahdollista optimoida kokonaiskustannuksia (mukaiillen Coble 2010).

Nohynek ja Lumme (2004, s. 13) sekä Harris ja Piersol (2002, s. 528) toteavat, että tärkeimpiä syitä koneiden kunnonvalvonnalle ovat:

- Tuotantolinjan osan kriittisyys, jolloin yksittäisen koneen vikaantuminen vaikuttaa koko tehtaaseen
- Tuotantomäärien kohoaminen lisää seisokkituntien hintaa
- Pyörimisnopeuksien kasvu on aiheuttanut sen, että koneiden vikojen kehittyminen tapahtuu nopeammin
- Koneiden rakenteiden keventäminen on lisännyt valvonnan tärkeyttä
- Koneiden automatisoituminen on vähentänyt henkilökunnan määrää, jolloin säännöllinen koneiden aistinvarainen valvonta on vähentynyt
- Teollisuuden turvallisuuteen panostetaan yhä enemmän
- Teollisuuden ympäristövaikutuksia pyritään vähentämään

Kunnossapito, jonka yksi osa-alue kunnonvalvonta on, tiedostetaan yhdeksi suurimmista tuotannontekijöistä monilla teollisuuden aloilla ja sen merkitys kansantaloudessa on huomattava (Mikkonen ym. 2009, s. 37). Kunnossapidon kustannuksia on monia, mutta ne voidaan jakaa kahteen osaan; suoriin (välittömiin) kustannuksiin ja epäsuoriin

(välillisiin) kustannuksiin, kuten kuvassa 2. Suorat kustannukset on helppo mitata, mutta niillä on pieni vaikutus kokonaistulokseen. Epäsuorilla kustannuksilla on suurempi vaikutus kokonaistulokseen, mutta niiden vaikutus on vaikeasti mitattavissa. Oikein tehdyllä kunnonvalvonnalla pystytään vaikuttamaan edellä mainittuihin kustannuksiin. (PSK 5709:2004)



Kuva 2. Kunnossapidon kustannusten jäävuorimalli; ylhäällä suorat kustannukset ja alhaalla epäsuorat kustannukset (mukaillen ABB 2007).

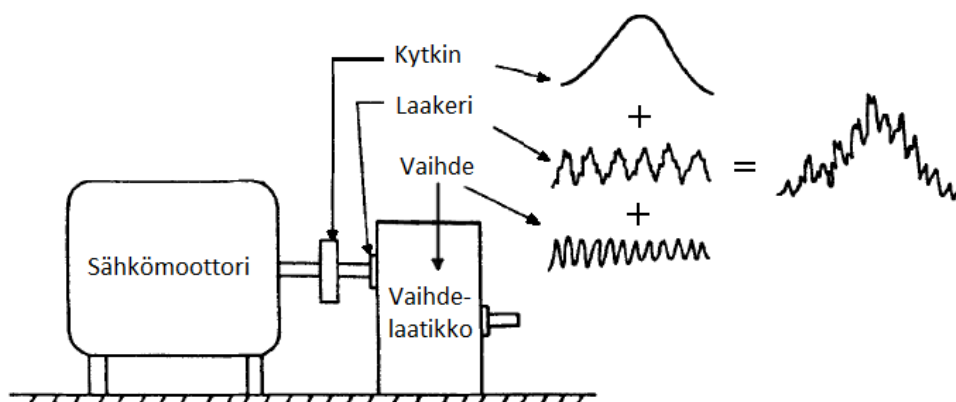
Kunnonvalvonnan taloudellinen kannattavuus syntyy kohdistamalla resursseja mittaussvälineisiin, -ohjelmiin, henkilökuntaan ja koulutukseen, mikä johtaa odottamattomien seisokkien vähenemiseen ja vikaantuneen koneen kunnossapitotöiden oikea-aikaiseen suorittamiseen. Standardin PSK 5709 (2004, s. 3) mukaan kunnonvalvonnalla saadaan välillisiä tuottoja parantuneena työturvallisuutena sekä pienentyneinä laatukustannuksina ja ympäristöhaittoina. Lisäksi tuotantovälineiden käyttöikä kasvaa, prosessien hallintaa voidaan parantaa, hätätyövalmiuden ylläpitokustannuksia pienentää sekä tarpeettomia varaosia ja -koneita karsia. Välillisiä tuottoja saadaan myös suunniteltujen seisokkien ja jaksottaisen kunnossapidon määrien vähenemisestä sekä keston lyhenemisestä.

On tilanteita, jolloin ehkäisevällä kunnossapidolla ja kunnonvalvonnalla ei saavuteta sen lukuisia hyötyjä. Pääsyyt tähän ovat huono suunnittelu, hallinnointi ja raportointi, pitkäjänteisyyden puute sekä ammattitaidoton henkilöstö. Jotta ehkäisevällä kunnossapidolla ja kunnonvalvonnalla voidaan saavuttaa hyötyjä, tulee laitokselle valita oikeanlainen kunnossapitolaji, jonka valintaan vaikuttavat muun muassa teollisuudenala, laitekanta ja henkilöstön osaaminen. Onnistumisen kannalta on tärkeää, että koko organisaatio sitoutuu valittuun kunnossapitostrategiaan. (Girdhar & Scheffer 2004, s. 8)

2.3 Värähtely ja värähtelymittaus yleisesti

Yksi pääasiallinen keino koneen kunnon tutkimiseen on värähtelymittaus. Värähtelyn mittaaminen, seuraaminen ja analysointi on tehokas työkalu koneiden alkavien vikojen tunnistamiseen ja diagnosointiin. Koneesta mitattu värähtely sisältää paljon tietoa sen kunnosta, kunhan tieto on oikein tulkittu. Tästä syystä värähtelyä voidaan pitää koneen ”kielenä”, jolla se kertoo ongelmistaan. (Gupta 1997, s. 393)

Jokainen koneen osa synnyttää itselleen ominaisen värähtelyn. Koneen osien värähtelyt kulkeutuvat konetta pitkin. Kulkiessaan ne summautuvat muiden osien värähtelyjen kanssa, jolloin muodostuu koneelle ominainen värähtely, kuten kuvassa 3. Värähtelyjen summautuminen ei muuta yksittäisen värähtelyn taajuusominaisuuksia. (Collacott 1977, s. 105)



Kuva 3. Havaintokuva siitä kuinka kytkimen, laakerin ja vaihteen värähtelyt summautuvat yhdeksi värähtelyksi (mukaillen Gupta 1997).

Jokainen laite tai kone, jossa on liikkuvia osia, synnyttää värähtelyä ollessaan toiminnassa. Värähtelymittauksia käytetään yleensä teollisuudessa pyörivien laitteiden ja koneiden kunnonvalvontasovelluksissa. Koneen osista syntynyt värähtely kulkeutuu

muita osia pitkin koneen ulkopinnalle. Värähtely menettää osan energiastaan kohdatessaan rajapinnan, jonka vuoksi värähtely on yleensä voimakkainta värähtelyn lähteessä. Tästä syystä värähtelymittaukset pyritään suorittamaan siten, että värähtelylähteen ja anturin välillä on mahdollisimman vähän rajapintoja. (Collacott 1977, s. 105-106; PSK 5702:2007)

Värähtelyn taajuus riippuu useista tekijöistä, kuten koneen osien pyörimisnopeudesta ja koosta. Analysointia, jossa tarkastellaan koneen värähtelyn taajuustasoesitystä, kutsutaan taajuusanalyysiksi. Se on tehokas diagnosointiväline, koska värähtelyn taajuus yleensä osoittaa vian alkuperän. (Collacott 1977, s. 105-106)

Kun koneeseen muodostuu vika sen kokonaisvärähtelytasot tavanomaisesti kasvavat. Kasvaneet värähtelytasot voivat johtua esimerkiksi koneen osan viasta, ylikuormituksesta, huonosta suunnittelusta, epätasapainosta, kavitaatiosta tai muista vastaavista syistä. Näiden lisäksi väärin suoritettu kunnossapitotyö tai koneen korjaus, kuten epäonnistunut roottorin tasapainotus tai väärin asennettu laakeri voidaan havaita värähtelymittauksilla. Melkein 80 % pyörivien koneiden ongelmista liittyvät epätasapainoon tai linjausvirheeseen. Värähtelymittaus on yksi tärkeimmistä työvälineistä edellä mainittujen ongelmien havaitsemiseen. (Girdhar & Scheffer 2004, s. 8-10)

Värähtelymittauksella pystytään saamaan välittömästi tietoa tutkittavan koneen kunnosta, joten se soveltuu jatkuvaan ja jaksottaiseen kunnonvalvontaan. Tämän lisäksi kerätyn datan avulla on usein mahdollista paikantaa vian tarkka sijainti. Lisäksi kehittyneiden signaalinkäsittelymenetelmien avulla värähtelymittauksilla voidaan havaita alkavia vikoja jo hyvin varhaisessa vaiheessa. (Randall 2011, s. 6)

2.4 Värähtelyn teoriaa

Värähtely on koneen, koneen osan tai rakenteen edestakaista liikettä. Yksinkertaisesti värähtely pystytään esittämään jousi-massasysteeminä, joka on harmonisessa liikkeessä.

2.4.1 Jousi-massasysteemi

Yksikään kone ei ole täysin jäykkä eli kaikki värähtelevät koneet käyttäytyvät kuten jousi-massasysteemit (Mikkonen ym. 2009, s. 226). Tämän vuoksi jokainen kone aiheuttaa värähtelyä käydessään ja värähtelevät koneet voidaan esittää jousi-massasysteemeinä.

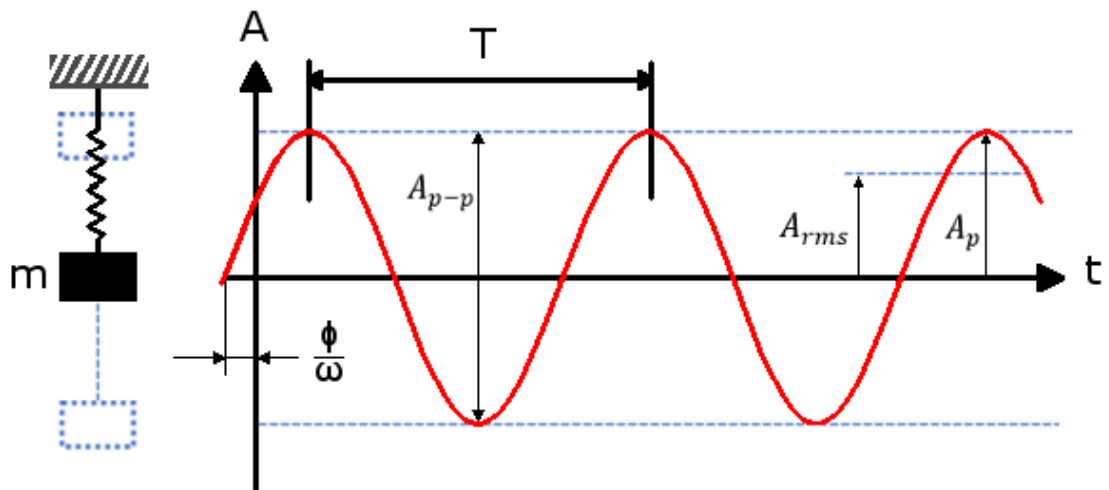
Ulkoisen kuormituksen, kuten moottorin pyörimisen, aiheuttamaa värähtelyä kutsutaan pakkovärähtelyksi. Jokaisella järjestelmällä on kolme olennaista ominaisuutta, jotka määrittävät miten järjestelmä käyttäytyy ulkoisen voiman vaikutuksesta. Värähtelevät järjestelmät sisältävät liiketilan muutosta vastustavan ominaisuuden, taivutusta vastustavan ominaisuuden sekä värähtelyliikettä vastustavan ominaisuuden. (Mobley 1999, s. 26-28; Harris & Piersol 2002, s. 38)

Vika muuttaa koneen värähtelykäyttäytymistä ja yleensä kasvattaa värähtelyn voimakkuutta. Yksinkertaistetusti voidaan todeta, että järjestelmän viasta aiheutuneen värähtelyn ollessa huomattavasti suurempaa kuin edellä mainittujen kolmen ominaisuuden, on vian havaitseminen mahdollista värähtelymittauksilla. (Girdhar & Scheffer 2004, s. 11-13)

Resonanssiksi kutsutaan ilmiötä, jossa tutkittavaan koneeseen kohdistuva herätetaajuus sekä tutkittavan koneen ominaistaajuus ovat lähellä toisiaan. Resonanssi aiheuttaa voimakasta värähtelyä koneessa. Resonanssi on yksi yleinen tilanne, jolloin värähtelyn voimakkuuden huomattava kasvu ei välttämättä johdu koneessa olevasta viasta. (Mikkonen ym. 2009, s. 225-226)

Kuvassa 4 on esitetty yhden vapausasteen vaimentamaton jousi-massasysteemi. Kun systeemin massa m poikkeaa tasapainoasemasta, syntyy värähtelyä. Yhden värähdysliikkeen aikana massakeskipiste liikkuu tasapainoasemansa negatiiviselle ja positiiviselle ääriasennolle lähtöasemansa kautta, palaten lopuksi takaisin lähtöasemaansa. Kuvan vasemmalla puolella nähdään massan m siirtymä

värähdysliikkeen aikana. Oikealla puolella on esitetty massan värähtelyliike aikatasosignaalinä, jossa vaaka-akselilla on aika t ja pystyakselilla värähtelysuure A . Yhteen värähdysliikkeeseen kuluva aikaa T kutsutaan värähdysajaksi tai jaksoksi. A_p on värähtelyn huippuarvo, A_{p-p} on värähtelyn huipusta-huippuun arvo, A_{rms} on värähtelyn tehollisarvo, ϕ on vaihekulma ja ω on kulmataajuus; $\omega = 2\pi f$, jossa f on taajuus. Kuvan 4 jousi-massasysteemiä ei ole käytännössä olemassa, koska siinä ei ole vaimennusta c , jolloin se ei lakkaa ikinä värähtelemästä ilman ulkoisen voiman vaikutusta.



Kuva 4. Vasemmalla yhden vapausasteen vaimentamaton värähtelijä sekä oikealla värähtelijän värähdysliike kuvattuna aikatasosignaalinä (mukaillen PSK 5701:2017).

Yhden vapausasteen värähtelijän voimatasapaino kirjoitetaan seuraavasti (Nohynek & Lumme 2004, s. 40-43):

$$F(t) = F_m(t) + F_v(t) + F_j(t) \quad (1)$$

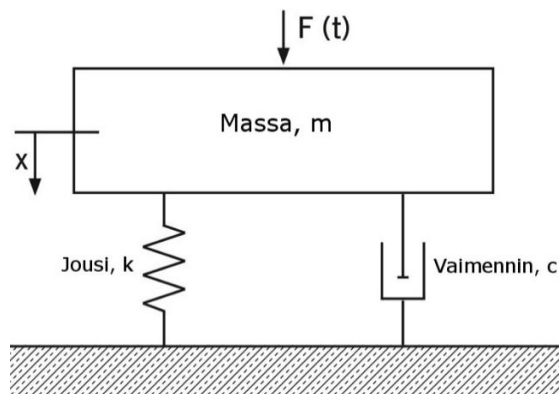
missä F on voima,
 F_m on massan hitausvoima,
 F_v on vaimennusvoima,
 F_j on jousivoima ja
 t on aika.

Hitausvoiman ollessa muotoa $m\ddot{x}$, vaimennusvoiman muotoa $c\dot{x}$ ja jousivoiman muotoa kx , kaava (1) voidaan kirjoittaa liikeyhtälön muotoon:

$$F(t) = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \quad (2)$$

missä F on voima,
 t on aika,
 m on massa,
 \ddot{x} on kiihtyvyys,
 c on viskoosivaimennuskerroin,
 \dot{x} on nopeus,
 k on jousivakio ja
 x on siirtymä.

Kaava (2) kuvastaa yhden vapausasteen vaimennettua värähtelyä, joka on esitetty kuvassa 5. Sen mukainen yhden vapausasteen värähtelijä on käytännössä harvinainen, mutta esimerkiksi epätasapaino voidaan mallintaa sen avulla (Mills 2010, s. 19). Yleensä koneilla on 6 vapausastetta.



Kuva 5. Yhden vapausasteen vaimennettu värähtelijä.

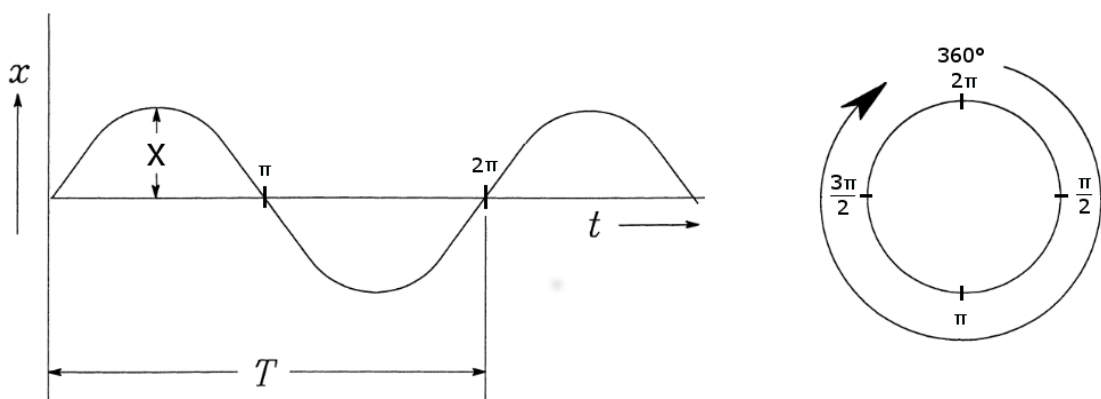
2.4.2 Harmoninen liike

Yksinkertaisinta jaksollista liikettä tai kiihtyvyyttä kutsutaan harmoniseksi. Harmoninen liike toistuu tietyn jakson, T , aikana, joka kuvastaa yhteen kierrokseen tai pyörähdykseen kuluvaa aikaa. Luonnossa värähtelyliike on yleensä sinimuotoista. Tämä takia siirtymän ja ajan suhde harmonisessa liikkeessä voidaan kirjoittaa seuraavasti (Mobley 1999, s. 17-18):

$$x(t) = X\sin(\omega t) \quad (3)$$

missä x on siirtymä,
 X on amplitudi,
 ω on kulmataajuus ja
 t on aika.

Värähtelyn jakson käänteisarvo on värähtelyn taajuus $f = \frac{1}{T}$, jonka yksikkö on hertsi [Hz]. Toinen taajuuden mitta on kulmataajuus $\omega = 2\pi f$ [rad/s], jossa yksi kierros on saavutettu 360° tai 2π radiaanin jälkeen. Taajuus kuvastaa, kuinka monta kierrosta tai pyörähdystä tapahtuu aikayksikköä kohti. Kuvassa 6 vasemmalla puolella on esitetty jakso aikatasosignaalin avulla ja oikealla puolella kulmataajuuden avulla. (Mobley 1999, s. 17-18)



Kuva 6. Jakson, T , määritelmä kahdella eri tapaa; vasemmalla jakson esitystapa aikatasosignaalin avulla ja oikealla kulmataajuuden avulla (mukaiillen Mobley 1999).

2.5 Signaalin derivointi ja integrointi

Värähtely pystytään esittämään esimerkiksi siirtymänä, nopeutena, kiihtyvyytenä tai kiihtyvyyden derivaattoina. Värähtelyliikkeen siirtymä voidaan derivoinnin avulla muuttaa muun muassa nopeudeksi, kiihtyvyydeksi, nykyksekseksi tai napseeksi, menettämättä sen sisältämää tietoa. Kaavaa (3) käyttäen, siirtymän ensimmäinen derivaatta ajan suhteen antaa nopeuden:

$$\dot{x}(t) = \omega X \cos(\omega t) \quad (4)$$

missä \dot{x} on nopeus.

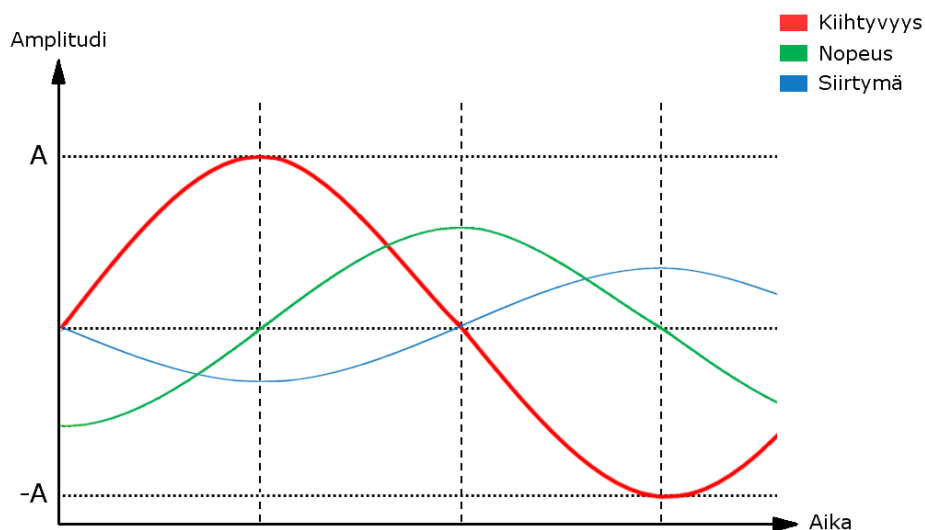
Siirtymän toinen derivaatta tai nopeuden ensimmäinen derivaatta ajan suhteen antaa kiihtyvyyden:

$$\ddot{x}(t) = -\omega^2 X \sin(\omega t) \quad (5)$$

missä \ddot{x} on kiihtyvyys.

Kaavoista (4) ja (5) nähdään, että nopeus ja kiihtyvyys ovat harmonisia, jos siirtymä on harmoninen (Mobley 1999, s. 19). Kun kaavaa (5) derivoidaan lisää, voidaan saavuttaa nykyä, napse ja vieläkin korkeampia derivaattoja. Vastaavasti integrointi toimii käänteiseen suuntaan kuin derivointi ja sillä voidaan muuttaa esimerkiksi kiihtyvyys nopeudeksi integroimalla kerran ajan suhteen tai siirtymäksi integroimalla se kahdesti ajan suhteen.

Kuvassa 7 on esitetty esimerkki integroinnin vaikutuksesta sinimuotoiseen kiihtyvyyssignaalin. Kaavoista (4) ja (5) nähdään, kuinka integrointi aiheuttaa sinifunktioon vaiheen siirtymisen ja amplitudin muutoksen. Tämän takia integrointi vahvistaa matalia taajuuksia. Derivointi on integroinnin käänteinen toimenpide, joten se vahvistaa korkeita taajuuksia.



Kuva 7. Esimerkki integroinnin vaikutuksesta sinimuotoiseen kiihtyvyyssignaaliin.

2.6 Värähtelymittausten suorittaminen

Värähtelymittausten suorittaminen oikein oikeanlaisilla laitteilla ja asetuksilla on oleellista, jotta voidaan varmistaa, että saatu värähtelydata on luotettavaa ja vertailukelpoista. Väärin suoritettu mittaus voi johtaa virheellisiin johtopäätöksiin ja turhiin kunnossapitotoimenpiteisiin, joista seuraa ylimääräisiä kustannuksia. Kun värähtely mitataan oikealla laitteella ja asetuksilla oikeasta kohdasta, on mahdollista havaita koneessa oleva vika.

2.6.1 Anturin ja mittalaitteen valinta

Värähtelymittauksia suorittaessa oikean mittalaitteen ja anturin valinta on kriittistä, jotta mitattavan koneen kunnosta saadaan hyödyllistä tietoa. Kiihtyvyysanturin valinnassa tärkeimpiä huomioonotettavia tekijöitä ovat mittauskohteen ympäristöolosuhteet sekä anturin herkkyys ja taajuusvaste. Ympäristöolosuhteisiin lukeutuvat lämpötila, kosteus ja sähkömagneettiset häiriöt. Lisäksi siihen lukeutuu käytettävissä oleva tila, joka voi rajoittaa anturin kaapelointia, kokoa ja kiinnitystapaa. (PSK 5703:2018, s. 2)

Mitattavan kohteen värähtelyn voimakkuuden ylittäessä amplitudialueen, jolla anturi toimii, se vääristää tai katkaisee anturin vasteen (Levinzon 2015, s. 9). Tämän vuoksi mitattavan kohteen värähtelyn voimakkuus ei saa ylittää anturin amplitudialuetta. Lisäksi anturin taajuusalueen tulee kattaa kaikki valvottavat taajuudet. Anturin taajuusalueen tulee olla lineaarinen valvotulla alueella ja herkkyyden tulee soveltua mitattavan koneen värähtelytasoon (PSK 5703:2018, s. 2).

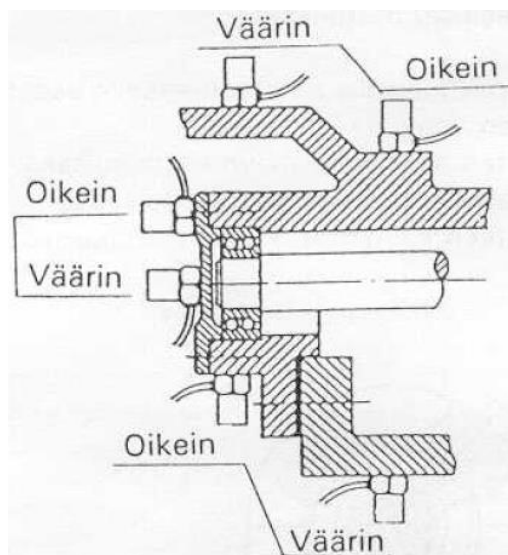
Kiihtyvyysanturin kaapelin valinnassa tulee huomioida ympäristön lämpötila, kosteus ja sähkömagneettiset häiriöt. Lisäksi kemiallinen ja mekaaninen rasitus, tilaluokka, huollot ja kunnossapidot sekä asennus tulee huomioida. Myös liittimen tulee täyttää samat mekaaniset-, sähköiset- ja ympäristövaatimukset kuin käytettävän anturin. (PSK 5703:2018, s. 2-3)

Mittalaitetta valittaessa tulee ottaa huomioon koneen kriittisyys ja tunnetut vikaantumismekanismit. Mittalaitteen tulee olla käyttökelpoinen mitattavien kohteiden ympäristöolosuhteissa, joihin lukeutuu muun muassa lämpötila, kosteus, iskun sieto, kemikaalit ja säteily. Käyttö- ja huoltonäkökohdissa tulee ottaa huomioon käyttäjäystävällisyys, koko, paino, akkukäyttöisyys ja kalibroitavuus. Lisäksi tekniset ominaisuudet, kuten tiedonsiirtoyhteys, tiedonkeruun ominaisuudet, analysointiominaisuudet ja signaalin esikäsittely tulee huomioida. (Harris & Piersol 2002, s. 506-508; PSK 5710:2010, s. 4)

2.6.2 Anturin kiinnitys

Kiihtyvyysanturi tulee kiinnittää oikealla tavalla koneeseen, jota halutaan tutkia, jotta värähtelymittauksista kerätty data on luotettavaa. Väärin kiinnitetty anturi aiheuttaa virheitä amplitudissa sekä vaiheessa ja sen seurauksena voi syntyä värähtelyä taajuuksilla, joilla ei ole mitään tekemistä koneen toiminnan kannalta. Pahimmassa tapauksessa vikaa ei huomata ollenkaan, joka voi johtaa katastrofaaliseen häiriöön. Oikein kiinnitetyn anturin mittaus on luotettavasti toistettavissa, eikä se rajoita anturin omaa taajuus- ja amplitudialuetta tai muuta mitattavan kohteen värähtelyominaisuuksia. Anturin kiinnitystapa on yleensä merkittävämpi taajuusvasteen lineaarista aluetta rajoittava tekijä korkeilla taajuuksilla, kuin anturin tekniset ominaisuudet. (Mobley 1999, s. 55; PSK 5703:2018)

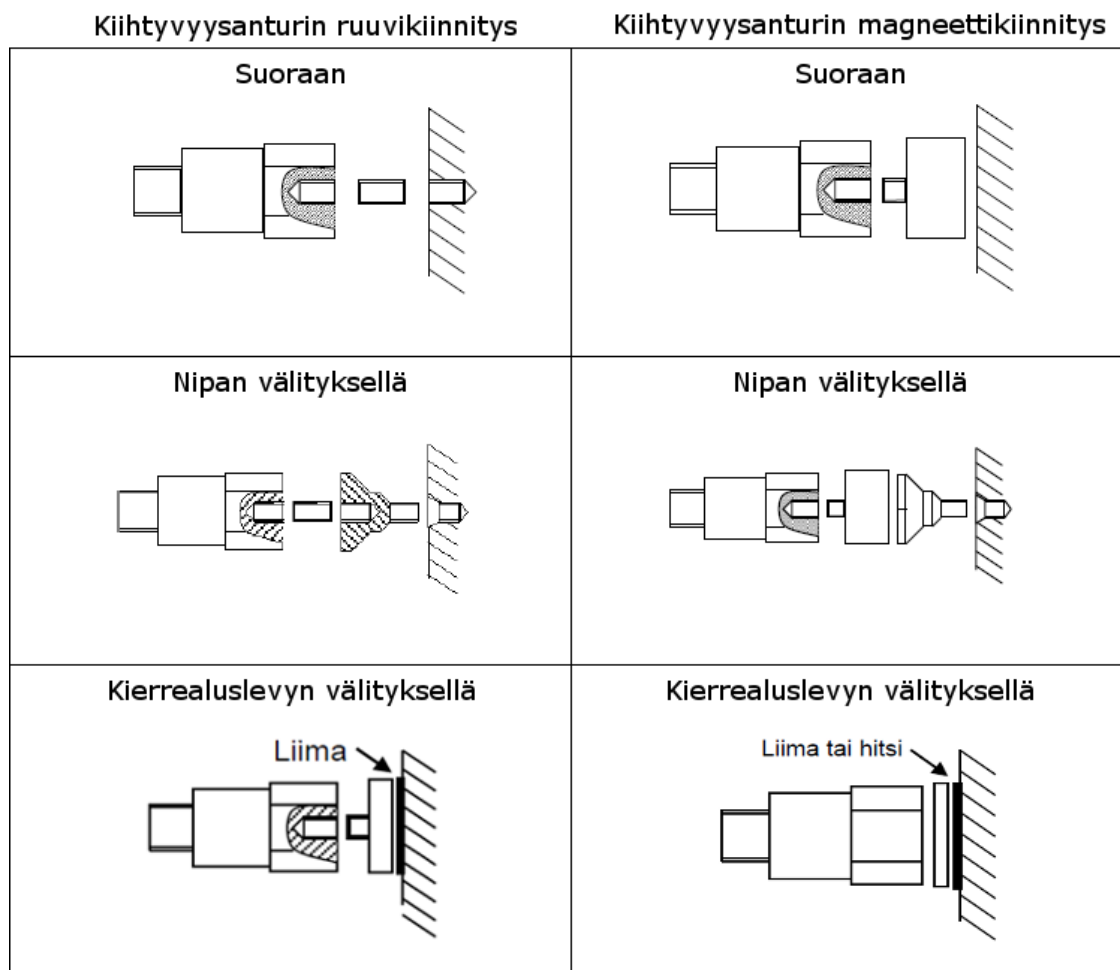
Standardin PSK 5702 (2007) mukaan mittauspiste tulee valita siten, että värähtelylähde ja mittausanturi ovat mekaanisesti mahdollisimman lähellä toisiaan, koska värähtely vaimenee eli menettää osan energiastaan kohdatessaan rajapinnan. Yleensä paras paikka mittauspisteelle on laakerointikohta, koska värähtely siirtyy laakerien kautta runkoon. Pääsääntöisesti värähtelymittaus tulee suorittaa säteissuunnassa ja tarvittaessa akselinsuuntaisesti. Kuvassa 8 on esitetty värähtelyanturin oikean paikan valinta standardin PSK 5702 (2007) mukaan.



Kuva 8. Anturin paikan valinta värähtelymittauksissa (PSK 5702:2007).

Oikean kiinnityksen lisäksi koneesta on valittava tarpeeksi monta mittauspistettä, jotta mikään ennalta arvioitava vika eri koneen osissa ei jää havaitsematta. Yleinen sääntö on, että jokaisen laakerin kohdalta mittaus suoritetaan vähintään säteissuunnasta. On kuitenkin olemassa tapauksia, jolloin mittausta ei suoriteta laakerin kohdalta. Esimerkiksi pumpun kavitointia tutkittaessa on tarpeellista suorittaa mittaus painepuolen putkesta. (Nohynek & Lumme 2004, s. 54)

Kiihtyvyysanturi voidaan kiinnittää ruuvi- tai magneettikiinnityksellä. Anturit voidaan myös kiinnittää mehiläisvahalla, liimalla tai pikakiinnittimellä. Ruuvikiinnitys on luotettavin kiinnitystapa, jotta anturin suuntaus ja puristuskuorma ovat samanlaiset jokaisella mittauksella. Tämä takaa tulosten tarkkuuden ja toistettavuuden sekä mahdollistaa koko anturin taajuusalueen käytön. Ruuvi- ja magneettikiinnitys voidaan toteuttaa joko suoraan, nipan välityksellä tai kierrealuslevyn välityksellä koneeseen. Kuvassa 9 on esitetty kiihtyvyysanturin ruuvikiinnitykset ja magneettikiinnitykset PSK-standardi 5703 (2018, s. 4-8) mukaisesti. (Mikkonen ym. 2009 s. 244-245)



Kuva 9. Kiihtyvyyssanturin ruuvi- ja magneettikiinnitys suoraan, nipan välityksellä tai kierrealuslevyn välityksellä PSK-standardi 5703 mukaan (mukaillen PSK 5703:2018).

2.6.3 Anturin ja mittalaitteen mittaasetusten valinta

Värähtelyn mittaamiseen liittyy suuri määrä vaihtoehtoisia mittaasetuksia, jotka täytyy valita mitattavan kohteen mukaan. Oikeiden mittaasetusten määrittäminen on erittäin tärkeää, sillä mittalaitteen rekisteröimän raakasignaalin laatu on avainasemassa vian havaitsemisen kannalta. Virheellisten asetusten vaikutusta ei pystytä myöhemmin korjaamaan, eikä tulosten huolellinen analysointikaan tilannetta voi enää parantaa. Virheellisesti valitut asetukset voivat johtaa väärin johtopäätöksiin, joiden takia vikoja ei huomata riittävän ajoissa tai niitä ei välttämättä huomata ollenkaan. (Mikkonen ym. 2009, s. 274)

Mittaasetukset tulee valita mittauskohteen laitetietojen perusteella pistekohtaisesti. Vaihtoehtoisia asetuksia jokaiseen mittauskohteeseen on lukuisia, jotka mahdollistavat hyvin monipuolisten mittausten suorittamisen. Mittausasetuksiin vaikuttavat muun muassa mitattavan koneen ja sen osien ominaisuudet, käytettävän anturin ominaisuudet

ja kiinnitys, käyttäjän kokemus ja osaaminen, yleiset tai laitoksen omat standardit sekä analyysiin käytettävissä oleva aika (Mikkonen ym. 2009, s. 265). Erityyppisten vikojen havaitsemiseksi samasta mittauspisteestä voidaan tarvittaessa suorittaa useita mittauksia eri asetuksilla (PSK 5721:2013, s. 2).

Mittausasetuksilla voidaan vaikuttaa joko suoraan mittaustulokseen tai tallennetun mittaustuloksen esitystapaan. Suoraan mittaustulokseen vaikuttavat asetukset muuttavat signaalia siten, että se on ainoa tallennettu tieto, jota ei voi palauttaa takaisin. Tällä tavoin virheellisesti suoritettua mittausta ei kyetä jälkeenpäin korjaamaan muuten kuin mittaamalla uudestaan. Esitystapaan vaikuttavia mittausasetuksia käytetään helpottamaan signaalin analysointia ja ne voidaan palauttaa takaisin alkuperäiseen muotoonsa. (Mikkonen ym. 2009, s. 265-268)

Useat mittausmenetelmät perustuvat siihen, että mitattavasta signaalista tutkitaan valittua taajuusaluetta ja sen ulkopuoliset signaalin komponentit suodatetaan pois. Esimerkiksi ali- ja ylipäästösuodatuksen avulla voidaan poistaa ei halutut komponentit, jotta tiettyjen vikatyypin havaitseminen helpottuu. Tämän lisäksi oikealla alipäästösuodatuksella pystytään ehkäisemään mittaussignaalin laskostuminen ja oikealla ylipäästösuodatuksella ehkäisemään hiihtorinneilmiö. (PSK 5721:2013, s. 6)

2.7 Värähtelymittausten analysointi

Värähtelymittauksista saatu signaali pyritään käsittelemään siten, että kiinnostuksen kohteena oleva tieto saadaan näkyviin sellaisessa muodossa, jossa sitä on helppo analysoida (Nohynek & Lumme 2004, s. 62). Yleisimmin värähtelymittausten tulokset esitetään ja analysoidaan aika- ja taajuustasossa.

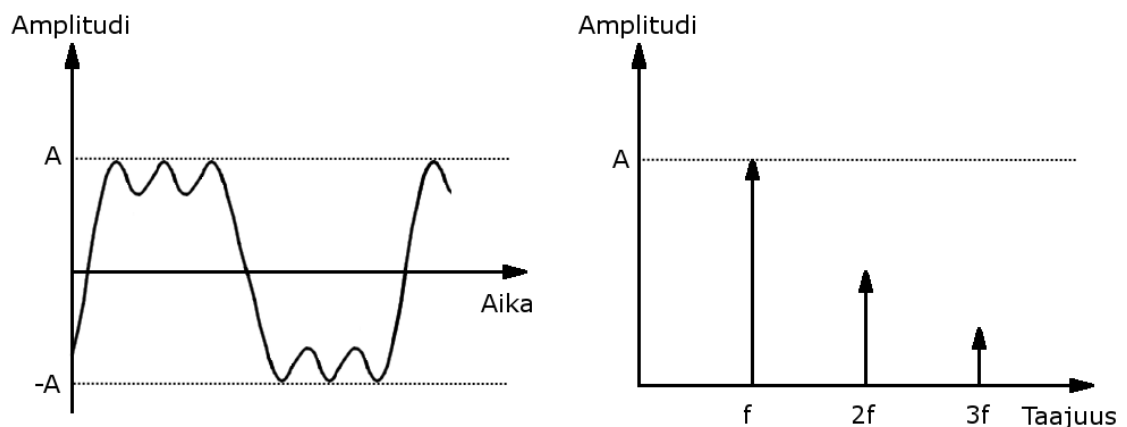
2.7.1 Aikatasossa

Aikatasossa koneen värähtely esitetään mitattavan suureen muutoksena aikaan nähden. Aikatasossa esitetty värähtelysignaali sisältää paljon eri lähteistä peräisin olevia värähtelyjä summutuneena, joten yksittäisen värähtelyn erottaminen on vaikeampaa kuin taajuustason signaalista (Mobley 1999, s. 44).

Aikatasosignaalin tarkastelu antaa yleiskuvan signaalin luonteesta. Sen avulla voidaan muun muassa etsiä selviä jaksollisuuksia signaalista ja tunnistaa mahdolliset mittaustekniset ongelmat. Aikatasosignaalia hyödynnetään yleensä kunnonvalvonnassa siten, että seurataan siitä laskettujen tunnuslukujen trendiä.

2.7.2 Fourier'n muunnos

Taajuus- ja aikatasosignaali sisältävät samat tiedot, mutta ne ovat esitetty eri tavalla. Nopea Fourier'n muunnos (fast Fourier transform, FFT) on algoritmi, jonka avulla diskreetti Fourier'n muunnos (discrete Fourier transform, DFT) voidaan laskea. DFT:n avulla aikatasosignaalin näytteet muunnetaan matemaattisesti diskreetiksi taajuuskomponenteiksi. Kompleksilukujonon moduuleista saadaan muodostettua kaksipuolisen amplitudispektri amplitudiarvot, joita voidaan käyttää spektrianalyysissä. Taajuusspektrin kuvaajassa vaaka-akselilla on taajuus ja pystyakselilla mitattavan suureen arvo. Kuvassa 10 on havaintokuva aikatasossa olevasta signaalista, joka on muunneltu DFT:n avulla taajuustasoon. (Mobley 1999, s. 45-47)



Kuva 10. Vasemmalla kuvassa signaali on esitetty aikatasossa. Oikealla kuvassa samainen aikatasosignaali on muunneltu DFT:n avulla taajuustasoon.

Yksikertainen harmoninen värähtely on yhteydessä pyörivän tai liikkuvan koneen osan kulmataajuuteen. Tällaiset taajuudet ovat jokin monikerta koneen osan pyörimisnopeudesta. Tästä syystä suuri osa koneiden vioista esiintyy pyörimisnopeuden taajuudella tai siihen liittyvissä taajuuskomponenteissa. Taajuusspektrin avulla pystytään tutkimaan helposti pyörimisnopeuden ja sen monikertojen taajuuksia, jonka vuoksi sitä käytetään pääasiallisesti kunnonvalvonnan analyyseissä. (Mobley 1999, s. 9-10)

2.7.3 Ikkunointi

Ikkunafunktio on matemaattinen funktio, jolla kerrotaan aikatazon näytejoukko. Ikkunointia (tai painotusta) käytetään yleensä aikatazon näytejoukon epäjatkuvuudesta johtuvien virheiden korjaamiseksi. Signaalin askelmainen muutos on ongelma, joka pyritään ikkunoinnin avulla poistamaan. Ikkunafunktion sisältämät arvot ovat tyypillisesti väliltä 0-1. (PSK 5701:2017, s. 8; De Carvalho ym. 2019, s. 104-111)

Tyypillistä ikkunafunktiota käytetään signaalin alku- ja loppupään vaimentamiseen, jolloin myös spektrin taajuuskomponenttien amplitudit pienenevät. Ikkunoinnin vaikutusta taajuuskomponenttien amplitudeihin voidaan vähentää korjauskertoimilla. Ikkunafunktioita on lukuisia, mutta yksi tyypillisesti käytetty on Hanning-ikkunafunktio, jonka korjauskerroin on 2. (Nohynek & Lumme 2004, s. 72; Mikkonen ym. 2009, s. 203)

2.7.4 Laskostuminen

Laskostuminen on ilmiö, jossa taajuus näyttäytyy digitaalisessa signaalissa eri taajuutena, kuin se on analogisessa signaalissa. Yleensä laskostuminen johtuu liian matalasta näytteenottotaajuudesta tai puutteellisesta laskostumisenestosuodattuksesta. Värähtelysignaalien käsittelyssä on yleensä käytännössä välttämätöntä alipäästösuodattaa analoginen signaali ennen A/D-muunnosta. Lisäksi Nyquistin teoreeman mukaan signaalin laskostuminen voidaan estää, kun signaalista suodatetaan pois kaikki ne taajuuskomponentit, joiden taajuus on yli puolet näytteenottotaajuudesta. (Harris & Piersol 2002, s. 475, 711; Bao ym. 2009, s. 4-5)

3 STANDARDISOINTI YLEISESTI

Standardeja ja standardisointijärjestöjä on useita. Standardit voivat liittyä lähestulkoon mihin tahansa asiaan teen maistelusta paineastioiden testaukseen. Teollisuuden näkökannalta standardisointi on erittäin tärkeää, koska sen avulla pyritään varmistamaan henkilöstölle turvallinen työympäristö, -tavat ja -koneet sekä kuluttajille turvalliset tuotteet.

3.1 Mikä on standardi

”Standardi on toistuvan tapauksen yhdenmukainen ratkaisu” (SFS 2019, s. 7). Tämä tarkoittaa sitä, että standardi on jonkin organisaation suositus siitä, miten jokin asia tulisi tehdä. Toisin sanoen, se on yhteisten toimitapojen laatimista (Korpela 2007).

Standardit ovat julkaistuja dokumentteja, jotka määrittelevät parametrit ja toimintatavat siitä, miten jokin asia tulisi tehdä. Ne valmistellaan avoimissa työryhmissä, joihin osallistuu teollisuuden, viranomaisten, kaupan, käyttäjien ja kuluttajien edustajia sekä mahdollisesti asiantuntijoita korkeakouluista ja tutkimuslaitoksista. Standardien valmistelussa pyritään ottamaan huomioon kaikkien osapuolten näkökannat ja sovittelemaan mahdolliset ristiriidat siten, että yksikään eturyhmä ei ole asioissa pysyvästi eri mieltä. Standardit ovat tarkoitettu yleiseen, toistuvaan ja mahdollisimman laajaan käyttöön. Standardien ajantasaisuus arvioidaan noin viiden vuoden välein ja tarvittaessa ne päivitetään. (SFS 2019, s. 12)

Standardit eivät ole lakeja tai asetuksia, vaan niiden periaate pohjautuu vapaaehtoiseen käyttöön, mikä hyödyttää kaikkia sitä käyttäviä osapuolia. Organisaatiot ja viranomaiset voivat tehdä standardeista pakollisia toimivaltansa rajoissa. Yleensä säädöksissä todetaan, että standardien mukainen ratkaisu täyttää viranomaisten vaatimukset eikä niitä määrätä pakollisiksi. (SFS 2019, s. 13)

3.2 Standardisoinnin tarve

Standardien avulla pystytään luomaan yhdenmukaisia sekä turvallisia tuotteita kuluttajille ja ympäristölle. Ne tarjoavat ihmisille ja organisaatioille yhteisen tavan kommunikoida. Standardit ovat mittojen, tuotannon ja kaupan työkaluja, joita on kaikkialla. Standardit

levittävät tietoa teollisuuksissa, joissa useiden valmistajien tuotteiden ja prosessien täytyy olla yhteensopivia. (CEN-CENELEC 2020)

Luomalla yhdenmukaiset käytännöt, jotka voidaan ymmärtää ja hyväksyä yleisesti, standardit muodostavat tuotekehityksen perustan. Tämä auttaa luomaan yhteensopivuutta ja -toimivuutta sekä yksinkertaistaa tuotteiden suunnittelua ja markkinoille tuomista. Standardit helpottavat kilpailevien tuotteiden ymmärtämistä ja vertailemista. Koska standardit voivat olla käytössä maailmanlaajuisesti, ne mahdollisesti lisäävät kansainvälistä kaupankäyntiä. Niillä pyritään maksimoimaan materiaalien, tuotteiden, prosessien ja palveluiden luotettavuus. Standardit helpottavat tekniikan kehitystä ja käyttöönottoa, jotka vaikuttavat ja muuttavat tapaa, miten elämme, teemme töitä ja kommunikoimme. (IEEE SA 2020)

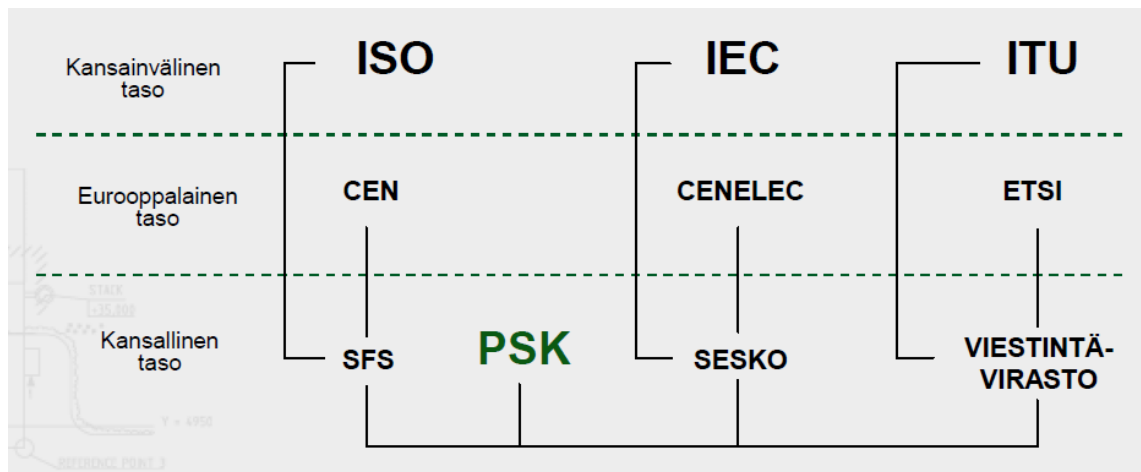
3.3 Standardisoinnin hyötyjä

Standardeja on kaikkialla ja lähes jokainen käyttää niitä tietoisesti tai tietämättään. Niiden yleinen käyttö johtuu siitä, että ne ovat suunniteltu lisäämään kaiken liiketoiminnan arvoa. Standardit luovat kansallista hyvinvointia, koska niiden avulla maan kansainvälinen kilpailukyky paranee, lainsäädäntötyö kevenee ja sen ylläpito helpottuu. Tämän lisäksi niiden ansiosta myös yhteiskunnan infrastruktuuri kehittyy ja kansalaisten elinympäristö paranee. Standardit ovat tarkoitettu helpottamaan viranomaisten, elinkeinoelämän ja kuluttajien elämää. (SFS 2019, s. 8)

Standardit edistävät yritysten liiketoimintaa parantamalla yritysten kilpailukykyä, toimintaympäristön hallittavuuden kasvua ja toiminnan tehostumista. Sillä lisätään tuotteiden yhteensopivuutta ja turvallisuutta, suojellaan kuluttajaa ja ympäristöä sekä helpotetaan kotimaista ja kansainvälistä kauppaa. Standardisoinnin avulla voidaan pienentää tutkimusten ja markkinoiden välistä kuilua ja helpottaa tutkimustulosten siirtämistä kansainvälisille markkinoille. (CEN-CENELEC 2020)

4 PSK STANDARDISOINTI

PSK standardisointi on vuonna 1973 perustettu teollisuuden puolueeton kehitysyksikkö, jonka päätavoite on suomalaisen teollisuuden ja sitä palvelevien yritysten kotimaista sekä kansainvälistä liiketoimintaa tukeva standardisointi ja koulutus. PSK standardisoinnin toimintaan kuuluu yhteistyö jäsenyritysten kanssa, tiedottaminen, PSK:n seminaarit, standardien jakelu ja työryhmien toiminta. Standardisoinnin kehityksessä käytetään eurooppalaisia sekä kansainvälisiä tuotestandardeja. PSK standardisointi sijoittuu kansalliselle tasolle standardisointiorganisaatioiden keskuudessa, joka on esitetty kuvassa 11. Vuonna 2019 PSK standardisointiin kuului yli 200 jäsenyritystä ja se oli julkaissut yli 400 standardia. (Koistinen 2019)



Kuva 11. PSK standardisointi sijoittuu kansalliselle tasolle standardisointiorganisaatioiden keskuudessa (Koistinen 2019).

4.1 Kunnonvalvonnan värähtelymittauksia käsittelevät PSK-standardit

PSK:n ryhmä 57 muodostuu 21:stä kunnonvalvonnan värähtelymittauksia käsittelevästä PSK-standardista. Ne sisältävät oleelliset käsitteet, määritelmät ja suureet, joita tarvitaan kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa. Lisäksi näissä standardeissa käsitellään muun muassa antureiden, liittimien ja kaapeleiden valintaa sekä asennusta. Standardeissa käydään myös läpi valvontamenetelmät, vianmääritys, toiminnan seurannan tunnusluvut, mittauksissa käytettävät mittausasetukset sekä mittalaitteiden tyypit ja valinta. Tämän diplomityön kannalta oleelliset PSK-standardit on listattu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Diplomityön kannalta oleelliset PSK-standardit.

PSK 5701	Kunnovalvonnan värähtelymittaus. Käsitteet ja määritelmät. Käytettävät suureet ja mittayksiköt
PSK 5702	Kunnovalvonnan värähtelymittaus. Mittauspisteen valinta ja tunnistaminen
PSK 5703	Kunnovalvonnan värähtelymittaus. Anturin, liittimen ja kaapelin valinta sekä asennus
PSK 5706	Kunnonvalvonta. Valvontamenetelmät
PSK 5709	Kunnonvalvonta. Toiminnan seuranta. Tunnusluvut
PSK 5710	Kunnovalvonnan värähtelymittaus. Mittalaitteiden tyypit ja valinta
PSK 5721	Kunnovalvonnan värähtelymittaus. Mittausasetukset
PSK 6201	Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät

Kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden ominaisuuksia ja suorituskkyä peilataan pääasiallisesti PSK-standardeihin 5703 ja 5710. Anturin ominaisuudet, jotka PSK-standardissa 5703 käsitellään, ovat anturin kuoren soveltuvuus käyttöympäristöön sekä ympäristöolosuhteet kuten anturin koko ja kiinnitystapa. Lisäksi PSK-standardissa 5703 ympäristöolosuhteiksi mainitaan muun muassa lämpötila, likaisuus, kosteus ja sähkömagneettiset häiriöt. Näiden lisäksi standardissa käsitellään anturin amplitudialue, jota värähtelyn voimakkuus ei saa ylittää sekä anturin taajuusalue, jonka tulee kattaa kaikki valvottavat taajuudet. (PSK 5703:2018)

Standardissa PSK 5710 luokitellaan värähtelymittalaitteet neljään eri tyyppiin sekä esitetään niiden soveltuvuus koneiden kunnonvalvontaan ja suojaukseen sekä vikojen määrittämiseen. Mittalaitteet jaetaan neljään eri tyyppiin ja käyttökohteeseen seuraavasti (PSK 5710:2010, s. 2-3):

- Tyypin 1: Kokonaistasoa mittaavat laitteet. Mitattua värähtelyä kuvaa yksi tunnusluku. Käytetään yleensä yksinkertaisten vikaantumismekanismien todentamiseen kuten puhaltimen tasapainotilan valvontaan.
- Tyypin 2: Korkeataajuisia, tyypillisesti yli 5000 Hz, värähtelyä mittaavat laitteet. Mitattua värähtelyä kuvaa korkeintaan kaksi tunnuslukua. Käytetään yleensä vierintälaakereiden kunnon ja voitelun valvontaan.
- Tyypin 3: Mittalaitteet, joissa on aseteltava taajuusalue. Mitattu värähtely voidaan esittää aika- ja taajuustasossa sekä standardin PSK 5706 mukaisilla tunnusluvuilla. Käytetään yleensä reittimittauksissa ja erityyppisten vikojen vakavuuden määrittämisessä.
- Tyypin 4: Laitteet ja ohjelmat sisältävät mittausjärjestelmä, joka tekee vianmäärittämisen ja mahdollisesti ennusteen koneen jäljellä olevasta turvallisesta käyttöajasta. Käytetään yleensä automaattisessa vikadiagnostiikassa.

Mitattua värähtelyä kuvaavat tunnusluvut on listattu standardissa PSK 5706. Siinä listataan signaalin taajuustasosta laskettavat tunnusluvut kuten esimerkiksi pyörimistaajuuden monikerroilla tapahtuvan värähtelyn voimakkuus ja värähtelyn voimakkuus hammaspyöräparin ryntötaajuudella, sen monikerroilla ja niiden sivunauhoilla. Lisäksi standardissa listataan yleisimmät aikatasosignaalista laskettavat tunnusluvut kuten kiihtyvyyden tehollisarvo ja huippuarvo. PSK-standardissa 5706 käydään myös läpi valvontamenetelmät, kuten kokonaistaso-, tunnusluku-, aikataso- ja spektrivalvonta. (PSK 5706:2015)

Mittalaitetyyppien lisäksi PSK-standardissa 5710 luetellaan yleiset vaatimukset, jotka koskevat mittalaitteita. Niiden yleisiin vaatimuksiin kuuluvat ympäristövaatimukset, kuten lämpötila, iskun sieto, säteily sekä magneetti- ja sähkökentät. Mittalaitteiden käyttö- ja huoltonäkökohtia ovat esimerkiksi käyttäjäystävällisyys, koko ja paino, akku- tai patterikäyttöisyys, kalibroituavuus, päivitettävyyden ja laajennettavuus tulevaisuuden tarpeisiin. PSK-standardissa 5710 luetellut mittalaitteiden tekniset ominaisuudet ovat tiedonsiirtoyhteys, tiedonkeruu ja analysointiominaisuudet, signaalin esikäsittely, anturin kytkentä, lisälaitteet, toimintanopeus ja yhteensopivuus laitoksen muiden järjestelmien kanssa. (PSK 5710:2010, s. 4)

5 PIETSOSÄHKÖINEN KIIHTYVYYSANTURI

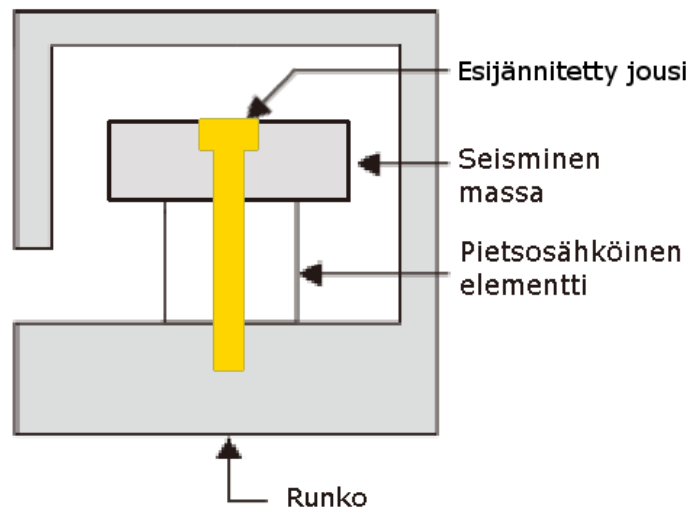
Pietsosähköinen kiihtyvyysanturi on laite, jonka synnyttämä jännite- tai varaussignaali vastaa mitattavan koneen tai sen osan kiihtyvyyttä pisteessä ja suunnassa, johon anturi on kiinnitetty. Pietsosähköiset kiihtyvyysanturit voidaan jakaa kahteen tyyppiin niiden ulostulon perusteella. Anturin ulostulo voi olla joko varaus- tai jännitesignaali. Kiihtyvyysanturi, jonka ulostulo on varaussignaali, on rakenteeltaan yksinkertainen, kestävä ja sitä voi käyttää korkeissakin lämpötiloissa, koska anturi sisältää koteloinnin, massan ja jousen lisäksi ainoastaan pietsosähköisen elementin. Tällaisia antureita käytetään, kun anturin tulee kestää todella kuumia olosuhteita, kuten voimalaitoksen turbiinin kunnonvalvonnassa. (Girdhar & Scheffer 2004, s. 32-33)

Sisäisellä elektroniikalla varustettu pietsosähköinen (integrated electronics piezo-electric, IEPE) kiihtyvyysanturi on pyörivien koneiden kunnonvalvonnassa yleisimmin käytetty anturityyppi, jonka ominaisuuksiin tässä kappaleessa keskitytään. Tämä johtuu muun muassa siitä, että IEPE-kiihtyvyysanturi on kompakti, eikä juuri vaikuta mittauskohteen värähtelytilaan. Lisäksi IEPE-kiihtyvyysanturi on kevyt, suhteellisen edullinen valmistaa, kestävä sekä melkein huoltovapaa, koska siinä ei ole liikkuvia eikä kuluvia osia. Tämän lisäksi se on epäherkkä ympäristöolosuhteille sekä monipuolinen eli sillä voidaan mitata matalia ja korkeita taajuuksia. (Girdhar & Scheffer 2004, s. 32; Mikkonen ym. 2009, s. 237)

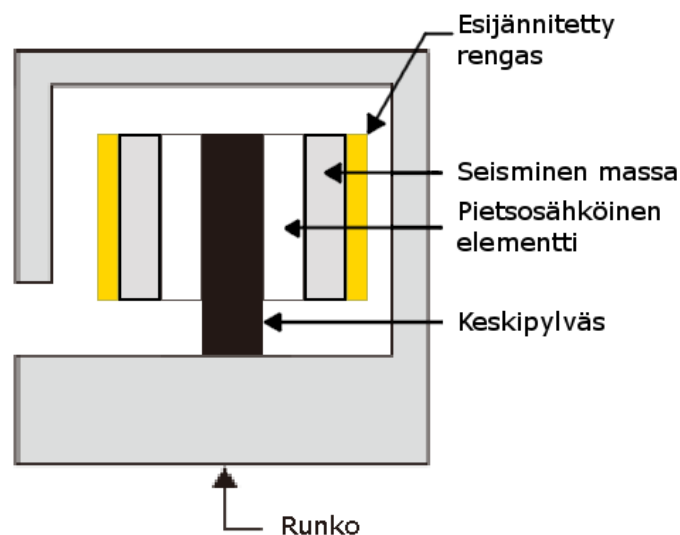
IEPE-kiihtyvyysantureilla mitatun värähtelysignaalin siirtäminen on mahdollista toteuttaa langattomalla tiedonsiirrolla. Tästä esimerkkinä on SKF:n langaton pietsosähköinen IMx-1-kiihtyvyysanturi (SKF 2020). Myös pietsosähköisiä MEMS-kiihtyvyysantureita on mahdollista valmistaa (Wang ym. 2003; Naduvanamani & Iyer 2016). Kuitenkaan tällä hetkellä kumpikaan edellä mainituista anturityypeistä ei ole yhtä laajassa käytössä kuin kaapeloitu IEPE-kiihtyvyysanturi. Tämän vuoksi työssä keskitytään kaapeloidun IEPE-kiihtyvyysanturin tarkasteluun.

5.1 Piettosähköisen kiihtyvyyssanturin rakenne

Kiihtyvyyssanturin osat ovat seisminen massa, pietsosähköinen elementti, runko ja esijännitetty jousi tai rengas. Tämän lisäksi IEPE-kiihtyvyyssanturissa on sisäänrakennettu varausvahvistin. Tyypillisesti pietsoelementti on kuormitettu esijännitetyn jousen tai renkaan avulla seismisen massan ja rungon väliin, kuten kuvissa 12 ja 13 on esitetty. (Randall 2011, s. 13)



Kuva 12. Esimerkki puristustyyppisen kiihtyvyyssanturin rakenteesta.



Kuva 13. Esimerkki leikkaustyyppin kiihtyvyyssanturin rakenteesta.

Kiihtyvyyssanturin tuntoelin on pietsosähköinen elementti, joka toimii kuin jäykkä jousi (Serridge & Licht 1987, s. 13-14). Se yhdistää seismisen massan runkoon tai keskipylvääseen riippuen anturityypistä. Rakenteensa ja toimintaperiaatteensa mukaan

anturit voidaan jakaa puristus-, taivutus- tai leikkausvärähtelyllä toimiviin tyyppeihin. Puristustyyppin anturissa osat ovat päällekkäin, kuten kuvassa 12 on esitetty. Leikkaustyyppin anturissa osat ovat koottu keskipylvään ympärille puristusrenkaan tai liiman avulla, kuten kuvassa 13 on esitetty. Leikkaustyyppin kiihtyvyysanturi on suosituin värähtelymittauksissa, koska se on muun muassa kompakti, kestävä, sillä on korkea ominaisvärähtelytaajuus ja se eristää pietsosähköisen elementin anturin rungosta, suojaten sitä runkoon kohdistuvilta jännityksiltä ja lämpömuunnoksilta. (Wilson 2005, s. 142, 289)

Tavanomaisesti IEPE-kiihtyvyysanturit ovat sylinterin muotoisia ja suhteellisen kevyitä muutamasta grammasta puoleen kilogrammaan asti. Niiden halkaisija voi vaihdella useasta millimetristä muutamaan senttimetriin ja niiden korkeus on yleensä 20 – 60 millimetrin välillä. Yleensä anturin seismisen massan painon lisääminen kasvattaa anturin herkkyyttä ja pienentää resonanssitaajuutta, kun taas seismisen massan painoa pienentämällä on päinvastainen vaikutus anturin herkkyyteen ja resonanssitaajuuteen. Loppujen lopuksi anturin tuntoelimellä ja vahvistimella on suurin vaikutus anturin ominaisuuksiin. Esimerkiksi taajuusvasteen lineaarinen alue matalilla taajuuksilla on pääasiallisesti riippuvainen varausvahvistimien ominaisuuksista. (Harris & Piersol 2002, s. 418-422)

5.2 Pietsosähköisen tuntoelimen materiaali

Pietsosähköisenä materiaalina voivat olla tietyt kiteet tai keraamiset elementit, jotka voivat olla luonnollisesti muodostuneet tai keinotekoisesti valmistettu. Tällaiset materiaalit synnyttävät sähköisen varauksen suhteessa niihin kohdistuvaan mekaaniseen voimaan, muodostaen kiihtyvyysanturin toiminnan kannalta yhden tärkeimmistä komponenteista.

Pietsosähköisinä elementteinä voidaan käyttää luonnollisia kristalleja, kuten kvartsia tai turmaliinia. Luonnollisten kristallien herkkyys ja sisäinen kapasitanssi ovat yleensä matalampia kuin ferrosähköisten keraamisten elementtien. Tämän lisäksi pietsosähköisen elementin rakenne ja muoto ovat riippuvaisia luonnollisen kristallin koosta ja ominaisuuksista, josta elementti leikataan. Edellä mainittujen ominaisuuksien takia luonnollisia kristalleja käytetään harvemmin kiihtyvyysantureiden pietsosähköisenä elementtinä. (Serridge & Licht 1987, s. 30)

IEPE-kiihtyvyysanturissa yleisimmin käytetty pietsosähköinen materiaali on polarisoitu keraami, lyijyzirkonititanaatti (lead zirconate titanate, PZT). PZT-keraameilla on vahva suhde sähköisten ja mekaanisten ominaisuuksien välillä, jolloin pieni siirtymä materiaalissa synnyttää suuren jännitteen (Fleming & Moheimani 2006, s. 1). Ne voidaan valmistaa haluttuun muotoon ja niiden ominaisuuksia muuttaa eri käyttötarkoituksiin. PZT:lla on korkea herkkyys, laaja taajuusalue sekä pieni kohina (Levinzon 2015, s. 53-54). Tämän lisäksi ne ovat edullisia ja helppoja valmistaa sekä niillä on loistava aika- ja lämpöstabiilisuus (Harris & Piersol 2002, s. 423).

5.3 Pietsosähköisen kiihtyvyysanturin toimintaperiaate

Kun kiihtyvyysanturiin kohdistuu mekaaninen heräte, syntyy pietsosähköiseen elementtiin kiihtyvyyteen a ja massa m verrannollinen voima F . Pietsosähköiseen elementtiin kohdistuva voima on seismisen massan ja herätekihtyvyyden tulo. Pietsosähköiseen elementtiin kohdistuvan voiman ja siitä syntyvän sähkövarauksen suuruus on riippuvainen massan tai kiihtyvyyden suuruudesta. Näin ollen kiihtyvyysanturin toiminta perustuu Newtonin toiseen lakiin (Wilson 2005, s. 138):

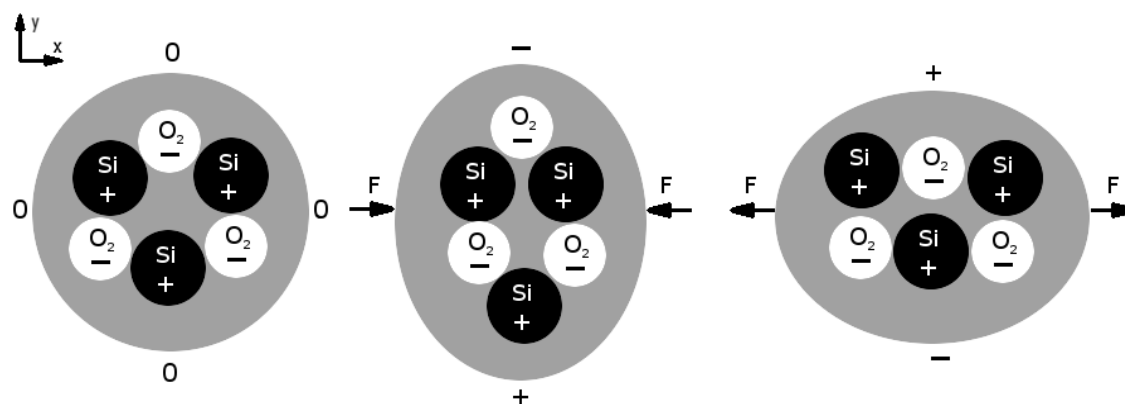
$$F = ma \tag{6}$$

missä F on voima,
 m on massa ja
 a on kiihtyvyys.

Pietsosähköiseen elementtiin liitetty seisminen massa puristaa vai venyttää elementtiä hitausvoimien vaikutuksesta. Elementin puristus tai veto synnyttää anturin kiinnityspisteen kiihtyvyyteen verrannollisen, jatkuvasti suuruuttaan ja etumerkkiään (+, -) vaihtavan varauksen. Syntyvä varaus johdetaan varausvahvistimeen, jossa se muunnetaan jännitteeksi, josta muodostuu värähtelymittauksissa käytettävä jännitesignaali. (Randall 2011, s. 13)

Pietsosähköinen ilmiö voidaan esittää yksinkertaistetusti vuonna 1927 esitetyn mallin mukaan. Kuvassa 14 on esitetty poikkileikkaus yhdestä kvartsikiteen elementistä, joka sisältää kolme atomia piitä ja kuusi atomia happea. Koska kolmella piiatomilla ja kuudella

happiatomilla on yhtä monta negatiivista ja positiivista varausta, vallitsee elementissä sähköisesti neutraali tila, kun siihen ei kohdistu mekaanista rasitusta. Kyseinen tila on esitetty kuvassa 14 vasemmalla puolella. (Fraden 2016, s. 104-106)



Kuva 14. Havaintokuva pietsosähköisestä ilmiöstä. Vasemmalla kvartsikide elementtiin ei kohdistu mekaanista rasitusta. Keskellä elementtiin vaikuttaa puristava voima ja oikealla vetävä voima (mukaillen Fraden 2016).

Keskellä kuvaa 14 on esitetty puristavan voiman, F , vaikutus elementtiin, joka luo piiatomin puolelle positiivisen varauksen ja happiatomin puolelle negatiivisen varauksen. Tämä aiheuttaa varauksen epätasapainon elementissä y-akselin suhteen. Veto aiheuttaa päinvastaisen reaktion elementissä, joka on havainnollistettu kuvan 14 oikealla puolella. Näiden varausten havaitsemiseksi pietsosähköisen elementin molemmille puolille vaaditaan vähintään yksi elektrodi, jotka yhdessä muodostavat varaussignaalin. (Fraden 2016, s. 104-106)

Pietsosähköisen elementin toimintaperiaate tarkoittaa sitä, että pietsosähköinen kiihtyvyyssanturi on aktiivinen sähköjärjestelmä. Pietsosähköinen elementti tuottaa vasteen ainoastaan kuormituksen muuttuessa. Tästä syystä IEPE-kiihtyvyyssanturit eivät tuota vastetta hyvin matalilla taajuuksilla. (Fraden 2016, s. 110)

5.4 Pietsosähköisen kiihtyvyyssanturin sähköteho ja tiedonsiirto kaapeleilla

Pietsosähköisellä elementillä on korkea impedanssi, joka vastustaa vaihtovirtaa. Korkean impedanssin takia elementin tuottamaa varaussignaalia ei voida kuljettaa pitkiä matkoja ilman signaalin laadun kärsimistä. Lisäksi varaussignaali on herkkä muuttamaan muotoa ympäristön vaikutuksesta tai kaapelin synnyttämästä kohinasta. Tästä syystä

varaussignaali muunnetaan varausvahvistimella jännitesignaaliksi, joka pystyy kulkemaan pitkiäkin matkoja ilman laadun huononemista. (Wilson 2005, s. 289)

Jotta mittaussignaalin laatu ei kärsi, tulee kaapeloinnissa käyttää pari- tai koaksiaalikaapelia. Parikaapelissa on kaksi johdinta, joissa molemmissa johtimissa kulkee virtapiiriin vaadittava virta sekä värähtelysignaali. Parikaapelin molemmat johtimet vaaditaan yhden toimivan virtapiiriin muodostamiseen. Parikaapelin johtimet ovat kierretty toistensa ympärille, joka vähentää sähkömagneettista induktiota. Kun mittauksissa joudutaan käyttämään pitkiä kaapeleita, jolloin ne ovat alttiimpia useammalle kohinanlähteelle, suositellaan käytettäväksi suojattua parikaapelia (SKF 2018, s. 79). Suojattua koaksiaalikaapelia suositellaan käyttämään väliaikaiseen mittaukseen tai kannettavalla mittalaitteella (Wilcoxon 2018, s. 7).

Kaapelin tärkein ominaisuus on sen ominaisimpedanssi. Kiihtyvyysanturin ominaisimpedanssin tulee olla lähellä kaapelin ominaisimpedanssia. Jos ominaisimpedanssit eroavat toisistaan huomattavasti, aiheuttaa kaapeli signaaliin heijastumista, joka vääristää signaalin laatua ja voimakkuutta. (SKF 2018, s. 80)

Eliesin (2015, s. 185) tutkimuksessa tarkasteltiin 30 kaupallisen IEPE-kiihtyvyysanturin sähkötehoa, joista 18 anturia oli yksiakselisia ja 12 anturia oli kolmiakselisia. Tutkimuksessa todettiin, että IEPE-kiihtyvyysantureiden sähköteho oli pääsääntöisesti 400-700 mW luokkaa.

6 KAPASITIIVINEN MEMS-KIIHTYVYYSANTURI

MEMS-tekniikassa yhdistetään mikromekaaniset ja -sähköiset komponentit yhdeksi kokonaisuudeksi. Toimiakseen MEMS-laite tarvitsee ainakin yhden liikkuvan tai muovattavan osan. Sen kriittisten osien kokoluokka mitataan mikrometreissä, joka mahdollistaa älykkäiden järjestelmien luomisen, joissa antureihin on liitetty tietojenkäsittely- ja analysointiyksiköt. Tietojenkäsittely- ja analysointiyksiköt voivat sisältää muun muassa A/D-muuntimen, suodattimen, ikkunoinnin, FFT-laskennan ja mikroprosessorin. MEMS-laitteet ovat halpoja, luotettavia ja kooltaan hyvin pieniä. (Fraden 2016, s. 721)

Mikkosen ym. (2005, s. 244) mukaan MEMS-antureiden perusmateriaalina käytetään piitä, koska se omaa erinomaiset mekaaniset ominaisuudet. Piin murtolujuus on teräksen luokkaa, tiheys on lähellä alumiinia ja se on elastinen murtolujuuteen asti alle 650 C° lämpötilassa.

6.1 Kapasitiivisen kiihtyvyysanturin toimintaperiaate

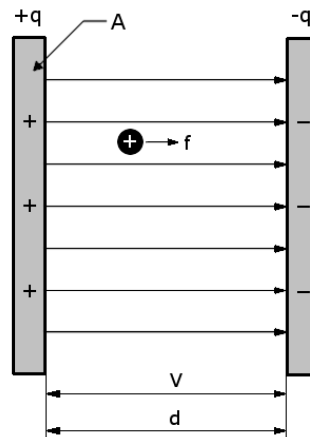
Kapasitanssi tarkoittaa järjestelmän kykyä kerätä ja varastoida energiaa sähkövarauksena. Kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin toiminta perustuu kapasitanssiin. Kondensaattoriksi kutsutaan laitetta, jonka osat voidaan varata sähköllä ja se kykenee säilyttämään sähköisen varauksen. Kondensaattorin kapasitanssi voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Fraden 2016, s. 77):

$$C = \frac{q}{\Delta V} \quad (7)$$

missä C on kondensaattorin kapasitanssi,
 q on johtimen sähkövaraus ja
 ΔV on potentiaaliero.

Kondensaattorin toimintaperiaate voidaan esittää kuvan 15 avulla, jossa kahden staattisen ja sähköä johtavan laatan levyn välillä vallitsee sähköinen potentiaaliero. Kun positiivinen sähkövaraus asetetaan laattojen tai levyjen väliin, vaikuttaa siihen

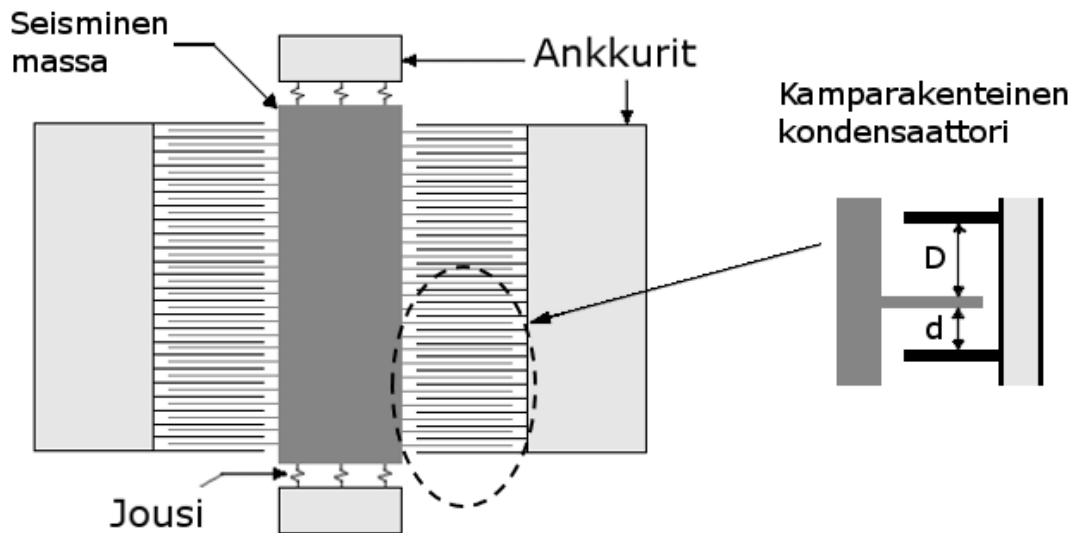
sähkökentän voimakkuus positiivisesta negatiiviseen. Tällöin positiivinen laatta tai levy hylkii sitä ja negatiivinen laatta tai levy vetää sitä puoleensa. Sähkövaraukseen vaikuttaa sen paikasta riippuen tietyn suuruinen ja suuntainen voima, f . (Fraden 2016, s. 77)



Kuva 15. Havaintokuva kapasitanssista ja kondensaattorista.

6.2 Kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyyssanturin rakenne

Kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyyssanturin rakenne perustuu mikrovalmistustekniikoilla valmistettuihin kondensaattoreihin. Tavanomaisesti käytetty kapasitiivinen MEMS-kiihtyvyyssanturi on niin sanottu kapasitiivinen siirtymäanturi, jossa kondensaattorin laatat tai levyt liikkuvat staattisiin elektrodeihin nähden aiheuttaen kapasitanssin muutoksen. Puhuttaessa kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyyssanturin tuntoelimestä tarkoitetaan ainoastaan seismisen massan ja staattisten laattojen tai levyjen muodostamia kondensaattoreita. Kuvassa 16 on esitetty kamparakenteinen kapasitiivinen MEMS-kiihtyvyyssanturi. (Fraden 2016, s. 205)



Kuva 16. Vasemmalla kuvassa kamparakenteisen kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyyssanturin tuntoelimen rakenne. Oikealla kuvassa tarkennettuna kamparakenteisen kondensaattorin rakenne.

Kondensaattorin rakenteessa laatat tai levyt ovat välimatkan d etäisyydellä toisistaan. Kondensaattorin, jonka laattojen tai levyjen välissä on eriste, kuten esimerkiksi ilma, kapasitanssi voidaan laskea seuraavasti (PRIME Faraday Partnership 2002, s. 31):

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (8)$$

missä C on kondensaattorin kapasitanssi,
 ϵ_r on suhteellinen permittiivisyys,
 ϵ_0 on sähkövakio,
 A on pinta-ala ja
 d on staattisen elektrodin ja seismisen massan laattojen tai levyjen välimatka toisistaan.

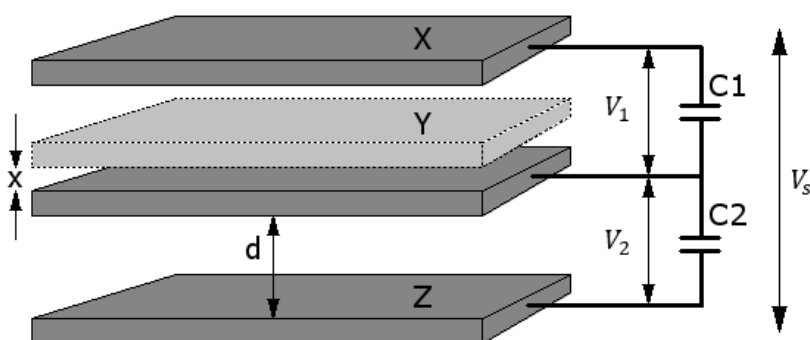
Värähtelyn vaikuttaessa anturin tuntoelimeen, sen seisminen massa liikkuu staattisten elektrodien suhteen, jolloin liikkuvan laatan tai levyn ja elektrodien välimatka d tai limittäisen osuuden pinta-ala A muuttuu. Koska kapasitanssi on kääntäen verrannollinen laattojen tai levyjen väliseen etäisyyteen, todella pienet seismisen massan siirtymät aiheuttavat suuren kapasitanssin muutoksen. (PRIME Faraday Partnership 2002, s. 31)

Kapasitiivinen tuntoelin sopii MEMS-teknologiaan hyvin, koska se on tarkka, halpa ja yksinkertainen valmistaa (Sethuramalingam & Vimalajuliet 2010). Toimiakseen se vaatii vähintään kaksi osaa: kiinteästi kotelointiin kiinnitetyn ankkurin ja koteloinnin sisällä liikuteltavissa olevan seismisen massan.

Kapasitiivisen kiihtyvyysanturin tuntoelimen laattojen tai levyjen väliset liikkeet ovat hyvin pieniä, joten tuntoelimeen kohdistuvat häiriöt tulee kompensoida luotettavasti. Yleensä kompensointi toteutetaan lisäämällä rakenteeseen 180° kulmassa oleva identtinen kondensaattori. Kuvassa 16 oikealla puolella on esitetty kamparakenteinen kondensaattori, jossa on kaksi identtistä kondensaattoria 180° kulmassa toisiinsa nähden. Värähtelyn vaikutuksesta seismisen massa välimatka toiseen staattiseen elektrodiin pienenee ja toiseen kasvaa. Tämä mahdollistaa kiihtyvyyden esittämisen kahden kondensaattorin välisten arvojen erotuksena. (Fraden 2016, s. 402)

Kapasitiivisten antureiden yleinen ongelma on lämpötilan vaikutus kolmeen parametriin, d , A ja ϵ_r , jotka vaikuttavat lähtösignaaliin. Tätä vaikutusta kutsutaan ajelehtimiseksi. Ajelehtiminen aiheuttaa anturin tuntoelimessä liikettä, vaikka mitattava laite ja anturi ei todellisuudessa liikkuisi. Beebyn ym. (2004, s. 93) mukaan tämä vaikutus voidaan kompensoida ylimääräisellä signaalinkäsittelypiirillä tai rakenteellisilla ratkaisuilla.

Kapasitiiviset anturit voidaan jakaa rakenteensa mukaan symmetrisiin ja epäsymmetrisiin antureihin. Symmetrisessä rakenteessa kapasitanssin, C , muutosta mitataan yhden liikkuvan ja kahden staattisen laatan tai levyn välillä, kuten kuvassa 17 (Edalatfar ym. 2016). Epäsymmetrisessä rakenteessa kapasitanssin muutosta mitataan yhden liikkuvan ja yhden staattisen laatan tai levyn välillä. (Fraden 2016, s. 205)



Kuva 17. Differentiaalinen kondensaattori.

Differentiaallinen kapasitiivinen anturi on rakenteeltaan symmetrinen, kuten kuvassa 17. Tämän rakenteen etuna on sen lämpötilakompensointi. Lämpötilanvaihtelut vaikuttavat molempiin kondensaattoreihin (C1 ja C2), jolloin lähtösignaali on ylemmän ja alemman kondensaattorin erotuksen funktio. Tällä tavoin saadaan minimoitua tai jopa mitätöityä lämpötilan vaihtelun vaikutus kiihtyvyysanturilta saataviin tuloksiin (Beeby ym. 2004, s. 93). Differentiaalisen kapasitiivisen anturin lähtöjännitteiden kaava on seuraavaa:

$$(V_2 - V_1) = V_s \left(\frac{x}{d} \right) \quad (9)$$

missä V_2 on laatan tai levyn X ja elektrodin Y välinen lähtöjännite,
 V_1 on laatan tai levyn Z ja elektrodin Y välinen lähtöjännite,
 V_s on syöttöjännite,
 x on siirtymä ja
 d on staattisen elektrodin ja seismisen massan levyjen välimatka toisistaan.

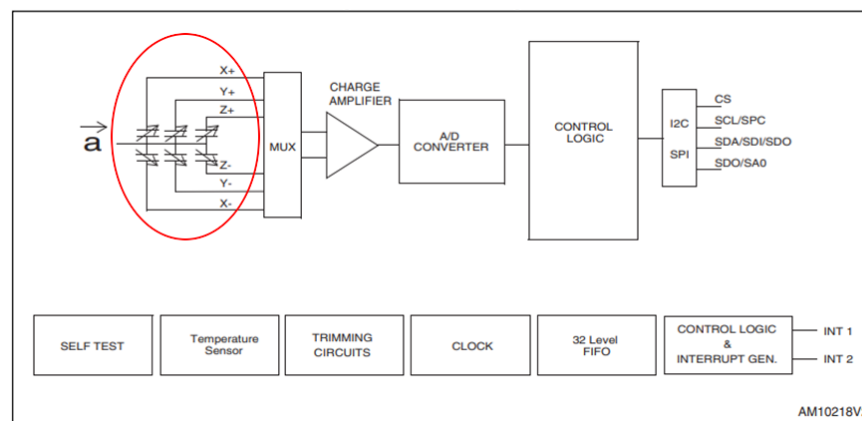
Kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin toiminnan kannalta tärkein komponentti on elektroniikkapiiri. Se mahdollistaa kapasitanssin muutoksen mittaamisen staattisessa ja dynaamisessa tapahtumassa. Elektroniikkapiiri myös mahdollistaa kapasitanssin muutoksen muuttamisen jännitteeksi. (Wilson 2005, s. 147)

Kapasitiivisen kiihtyvyysanturin seismiselle massalle on kaksi paikannusmittaus liitäntäpiiriä, avoin silmukka ja takaisinkytkentä. Avointa silmukkaa käyttävät kiihtyvyysanturit ovat yksinkertaisia ja edullisia. Avoimen silmukan käyttäminen asettaa anturille rajoitteita silloin, kun seismiseen massaansa kohdistuu suuri poikkeama. Takaisinkytkennässä piiriltä tulevan lähtösignaalin ja säätimen avulla seisminen massa voidaan ohjata takaisin lepoasentoonsa. Takaisinkytkentä mahdollistaa myös anturin itsetestauksen, joka helpottaa anturissa ilmenevien vikojen havaitsemista (Kularatna 2003, s. 575). Beebyn ym. (2004, s. 176-177) mukaan takaisinkytkennällä on kolme etua avoimeen silmukkaan verrattuna:

- Seismisen massan poikkeama pienenee huomattavasti, jolloin väliaineen puristumisen aiheuttaman vaimennuksen ja mekaanisen jousituksen epälineaarinen vaikutus pienenee huomattavasti
- Herkkyyden ja kaistanleveyden riippuvuuden pieneneminen
- Anturin kaistanleveys, dynaaminen mittausalue ja herkkyys voidaan räätälöidä kohteeseen valitsemalla oikeanlainen ohjausjärjestelmä

Kapasitiivista MEMS-kiihtyvyysanturia voidaan käyttää mittaamaan todella alhaisia taajuuksia. Lisäksi anturilla on mahdollista mitata vaimeaa värähtelyä. Kapasitiivisilla MEMS-kiihtyvyysantureilla on yleensä kuitenkin korkea kohinataso ja taajuusvasteen lineaarinen alue on rajoittunut korkeilla taajuuksilla verrattuna esimerkiksi tavanomaisiin pietsosähköisiin kiihtyvyysantureihin. (Wilson 2005, s. 149)

Yksi kapasitiivinen MEMS-kiihtyvyysanturi voi sisältää tuntoelimensä lisäksi useita muita komponentteja. Esimerkkinä tästä kuvassa 18 on esitetty STMicroelectronicsin LIS2DH12 kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin lohkokaavio (STMicroelectronics 2020). Anturi sisältää punaisella ympyröidyn tuntoelimensä lisäksi muun muassa varausvahvistimen, A/D-muuntimen ja lämpötila-anturin.



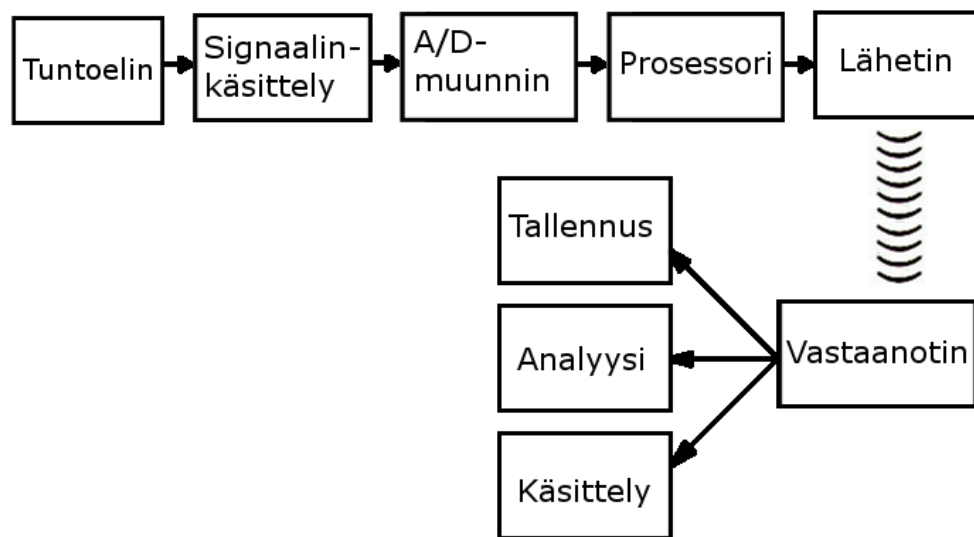
Kuva 18. LIS2DH12 kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin sisältämien komponenttien lohkokaavio. Punaisella ympyröity kohta on anturin tuntoelin (STMicroelectronics 2020).

MEMS-antureiden yhteydessä on tärkeää ottaa huomioon se, miten anturin tuntoelin ja muut komponentit kiinnitetään piirilevyllä ja kotelointiin. Tuntoelin voi olla kiinnitettynä myös koteloidun yksikön (system-in-package, SiP) sisälle. Tämä koteloitu yksikkö on mahdollista kiinnittää kokonaisuutena toisen kotelon sisään tai piirilevyllä. Muun muassa kiinnitystapojen jäykkyydellä ja kotelon rakenteilla sekä muiden komponenttien

sijoittelulla voi olla merkittävää vaikutusta mittaustulosten laatuun, luotettavuuteen ja toistettavuuteen. (Ramesham & Ghaffarian 2000)

6.3 Kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin langaton tiedonsiirto ja sähköteho

MEMS-antureiden pienen koon, alhaisen virrankulutuksen ja integroitavuuden ansiosta ne soveltuvat hyvin langattomaan tiedonsiirtoon. Kuvassa 19 on esitetty lohkokaavio langattoman tiedonsiirron toteutuksesta kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa.



Kuva 19. Lohkokaavio langattoman tiedonsiirron toteutuksesta kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa.

Tuntoelin, signaalin-käsittely ja A/D-muunnin ovat yleensä integroitu yhdelle piirilevyille tai kotelon sisälle. Lisäksi SiP:n on mahdollista integroida prosessori sekä lähetin, jotka kasvattavat yksikön virrankulutusta ja kokoa. Tuntoelimeltä tuleva signaali on luonteeltaan analogista. Langattomasti siirretty analoginen signaali on muun muassa herkkä signaalin kohinan lisääntymiselle. A/D-muuntimella analoginen signaali on mahdollista muuttaa digitaalseksi. Langattomasti siirretyllä digitaalisella signaalilla on huomattavasti pienempi riski kohinan lisääntymiselle kuin analogisella signaalilla. (Wilson 2005, s. 163-164)

Prosessorin tarkoitus on suorittaa käskyjä, jotka liittyvät muun muassa mittaamiseen ja tiedonsiirtoon. Prosessori sisältää useita eri osia, kuten sisäisen kellon sekä muistin, joka tallentaa hetkellisesti mitattua dataa. (Dargie & Poellabauer 2010, s. 51-52)

Lähettimeltä signaali kulkeutuu tukiaseman vastaanottoimeen, jossa se voidaan käsitellä, analysoida ja tallentaa. Tiedonsiirto toteutetaan yleensä radiotaajuudella, mutta se on myös mahdollista toteuttaa esimerkiksi infrapunalla tai ultraäänellä. Langaton lähetinmoduuli on yleensä energiaa kuluttavin osa anturia (Law ym. 2006, s. 5). Useat anturit voivat muodostaa langattoman anturiverkoston.

MEMS-antureihin on mahdollista integroida monia erilaisia ominaisuuksia. Virrankulutuksen kannalta kiihtyvyysanturin tärkein ominaisuus on lepotila. Se mahdollistaa anturin olemisen niin sanotussa virransäästötilassa, josta anturi voi poistua tietyn määrääjoin tai esimerkiksi aistiessaan värähtelyä. Anturin poistuessa lepotilasta se voi suorittaa mittaukset, signaalinkäsittelyn ja tiedonsiirron, jonka jälkeen sen on mahdollista palata takaisin lepotilaan. Anturin suorittaessa mittauksia sen virrankulutus on huomattavasti suurempaa kuin anturin ollessa lepotilassa. Tämän takia lepotila on yksi merkittävimmistä eroista virrankulutuksen kannalta MEMS-anturin ja perinteisen pietsosähköisen anturin välillä. (Looney 2014)

Eliesin (2015, s. 185) tutkimuksessa tutkittiin 40 kaupallisen kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin sähkötehoa, joista 15 oli yksiakselisia ja 25 oli kolmiakselisia. Tutkimuksessa todettiin, että kapasitiivisten kiihtyvyysanturien sähköteho oli yleensä alhaisin kaikista anturityypeistä. Kapasitiivisten kiihtyvyysantureiden sähköteho oli 0,3-300 mW luokkaa.

7 KIIHTYVYYSANTUREIDEN OMINAISUUKSIA

Kiihtyvyyssanturin ominaisuudet määrittelevät mihin käyttötarkoitukseen ja -kohteeseen kyseinen anturi soveltuu. Tässä kappaleessa käydään läpi diplomityön kannalta oleelliset kiihtyvyyssantureiden ominaisuudet.

7.1 Koko ja paino

Kiihtyvyyssanturin koko ja paino vaikuttavat sen herkkyyteen ja ominaistaajuuteen. Yleensä suurella anturilla on korkea herkkyys ja matala ominaistaajuus, kun taas pienellä anturilla on matala herkkyys ja korkea ominaistaajuus. (Harris & Piersol 2002, s. 425)

Anturin koko ja paino vaikuttavat mitattavan kohteen värähtelyyn, erityisesti silloin, jos mitattava kohde on pieni ja kevyt. Levinzonin (2015, s. 21) mukaan nyrkkisääntönä on, että anturin vaikutus jätetään käytännössä huomiotta, jos sen paino ei ylitä 10 prosenttia mitattavan koneen painosta.

Anturin koko rajoittaa sen mahdollisia kiinnityspaikkoja. Liian kookasta anturia ei voida kiinnittää ahtaisiin paikkoihin. Anturin ollessa tarpeeksi pieni ja kevyt, se voidaan jopa asentaa suoraan pyörivään värähtelylähteeseen, kuten esimerkiksi akseliin tai hammaspyörään.

7.2 Erottelukyky (resoluutio)

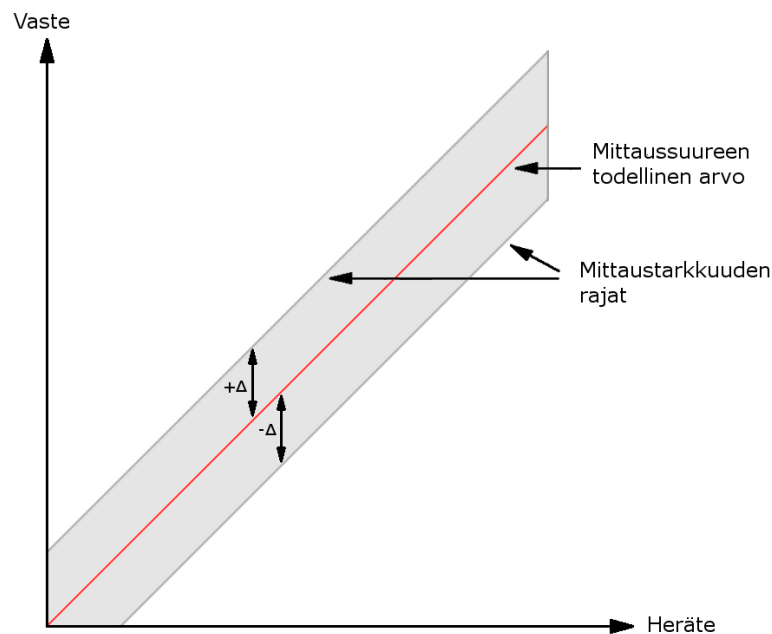
Anturin erottelukyky tarkoittaa pienintä herätteen muutosta, joka sillä voidaan havaita. Erottelukykyä yleensä rajoittava tekijä on kohina, jota kaikki anturit ja mittausjärjestelmät tuottavat. Pietsosähköinen elementti ja varausvahvistin ovat molemmat kohinanlähteitä, joista yleensä varausvahvistin synnyttää enemmän kohinaa kuin pietsosähköinen elementti (Levinzon 2015, s. 8).

Kohinan ollessa anturin erottelukykyä suurempaa, anturilla ei enää pystytä luotettavasti mittaamaan pienintä mahdollista herätteen muutosta. Tällöin anturin erottelukyky voidaan esittää spektrin kohinatiheytenä. Valkoinen kohina on yleinen kohinan muoto, joka tarkoittaa taajuustason signaalin kohinatiheyden olevan sama kaikilla taajuuksilla.

Se esitetään signaalin yksikkönä jaettuna kaistanleveyden neliöjuurella esimerkiksi $\mu V/\sqrt{Hz}$ tai $\mu g/\sqrt{Hz}$. (Wilson 2005, s. 3-4)

7.3 Mittaustarkkuus (mittausepävarmuus)

Mittaustarkkuus on tärkeä anturin ominaisuus, joka kertoo mittaussuureen mitatun ja todellisen arvon välisen poikkeavuuden. Yleensä antureiden mittaustarkkuus esitetään mittausepävarmuutena, joka kuvastaa mitattujen arvojen välistä virhettä. Kuvassa 20 on havaintokuva anturin mittausepävarmuudesta, jossa $\pm\Delta$ tarkoittaa aluetta, jolle anturin vasteen oletetaan sijoittuvan todellisesta arvosta. Mittausepävarmuuteen vaikuttavat monet seikat, kuten esimerkiksi materiaalin vaihtelu ja työnlaatu, suunnitteluvirheet tai valmistuksen toleranssit. Mittausepävarmuutta voidaan pienentää kalibroinnin avulla. (Fraden 2016, s. 39-42)



Kuva 20. Havaintokuva mittaustarkkuudesta.

7.4 Herkkyys

Herkkyys tarkoittaa herätteen ja vasteen välistä suhdetta. Suuri herkkyys tarkoittaa esimerkiksi sitä, että pieni kiihtyvyyden muutos aiheuttaa suuren jännitteen muutoksen. Kiihtyvyysanturin herkkyys tulee olla tunnettu, jotta anturilla suoritettujen värähtelymittauksien tuloksia voidaan analysoida luotettavasti. Kiihtyvyysanturin

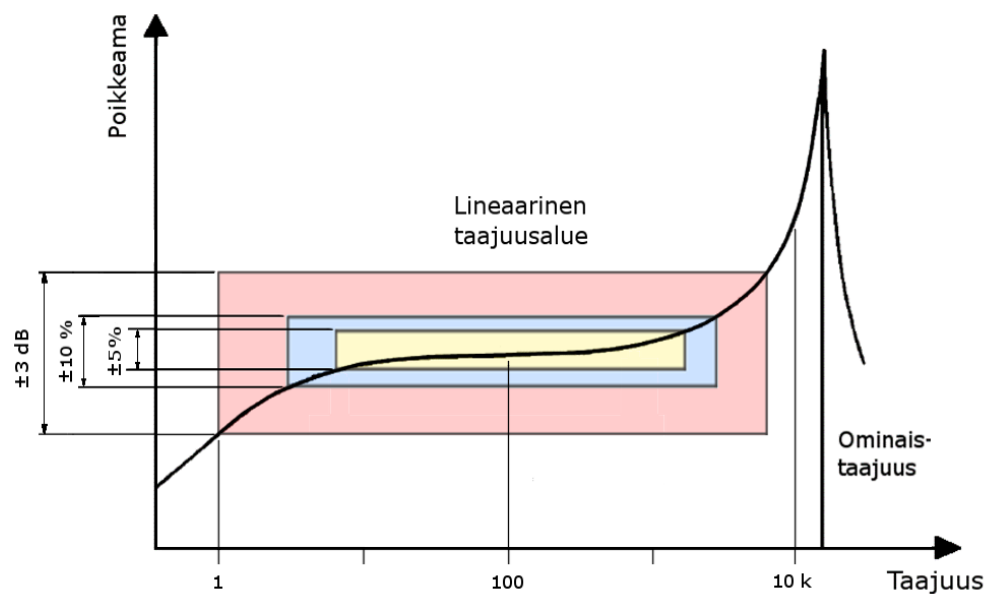
herkkyys voidaan esimerkiksi esittää lähtöjännitteen ja mitattavan kohteen kiihtyvyyden osamääränä (Wilson 2005, s. 2; Levinzon 2015, s. 8):

$$S = \frac{V_{out}}{a} \quad (10)$$

missä S on kiihtyvyyssanturin herkkyys,
 V_{out} lähtöjännite ja
 a on kiihtyvyys.

7.5 Taajuusvaste

Taajuusvaste kuvastaa järjestelmän tulo- ja lähtösuureiden välistä suhdetta taajuustasossa. Kiihtyvyyssanturin tapauksessa se tarkoittaa sitä, kuinka anturi reagoi tietyn taajuiseen herätteeseen eli toisin sanoen taajuusvaste kuvastaa anturin herkkyyttä tietyllä taajuudella. Taajuusvaste voidaan esittää kuvan 21 mukaisena taajuusvastekuvaajana, jossa pystyakselilla on esitetty anturin sisään- ja ulostulon poikkeama desibeleinä. Kuvan 21 vaaka-akselilla on esitetty taajuus hertseinä logaritmisella asteikolla. Pystyasteikon poikkeama voidaan myös esittää prosentteina desibelien sijaan. (Serridge & Licht 1987, s. 18-20; Harris & Piersol 2002, s. 417-418)



Kuva 21. Havaintokuva taajuusvastekuvaajasta. Lineaarinen taajuusalue on esitetty kuvassa punaisella (± 3 dB), sinisellä (± 10 %) ja keltaisella (± 5 %) värillä.

7.6 Lineaarinen taajuusalue

Taajuusvasteen lineaarisuus on kiihtyvyyssanturin olennainen ominaisuus värähtelymittauksissa. Järjestelmän lähdön tulee olla lineaarisesti yhteydessä tuloon yhtä suurella taajuusalueella ja dynaamisella mittausalueella kuin mittauksissa tarvitaan (Serridge & Licht 1987, s. 28). Tästä syystä taajuusvasteen lineaarista osaa yleensä käytetään värähtelymittauksia suorittaessa.

Anturin lineaarista taajuusaluetta rajoittavat anturin mekaaniset ja sähköiset ominaisuudet sekä anturiin mahdollisesti liitetyt lisälaitteet kuten varausvahvistin. Taajuusvasteen lineaarista aluetta matalilla taajuuksilla voivat rajoittavat esimerkiksi anturin sekä lisälaitteiden sähköiset ominaisuudet. Taajuusvasteen lineaarista aluetta korkeilla taajuuksilla voivat rajoittavaa muun muassa anturin mekaaniset ominaisuudet, kuten esimerkiksi anturin koko ja kiinnitys. Yleensä antureiden lineaarinen taajuusalue määritellään $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ tai ± 3 dB eli noin $\pm 30\%$ poikkeamana. Kuvassa 21 lineaarinen taajuusalue on esitetty punaisella (± 3 dB), sinisellä ($\pm 10\%$) ja keltaisella ($\pm 5\%$) värillä. (Harris & Piersol 2002, s. 416-418)

7.7 Anturin vasteen lämpötilariippuvuus

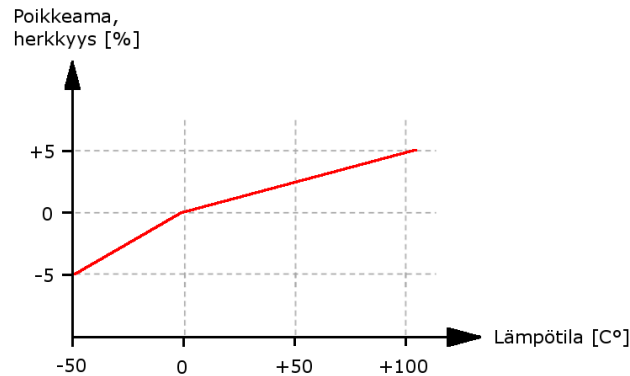
Anturin vasteen lämpötilariippuvuus kuvastaa kiihtyvyyssanturin herkkyyden muutosta käytettävällä lämpötila-alueella (Levinzon 2015, s. 13):

$$TR = \frac{\Delta S_T}{S_{RT}} 100 \% \quad (11)$$

missä TR on lämpötilan aiheuttama herkkyyden poikkeama [%],
 ΔS_T kiihtyvyyssanturin herkkyyden muutos ja
 S_{RT} on kiihtyvyyssanturin herkkyyys huoneenlämpötilassa.

Antureiden datalehtisessä vasteen lämpötilariippuvuus on yleensä esitetty kuvaajana. Kuvassa 22 on esitetty vasteen lämpötilariippuvuuden kuvaaja, jossa pystyakselilla on lineaarisella asteikolla herkkyyden poikkeama ja vaaka-akselilla lämpötila. Vasteen lämpötilariippuvuus voidaan myös esittää yksinkertaisesti herkkyyden poikkeamana yhtä

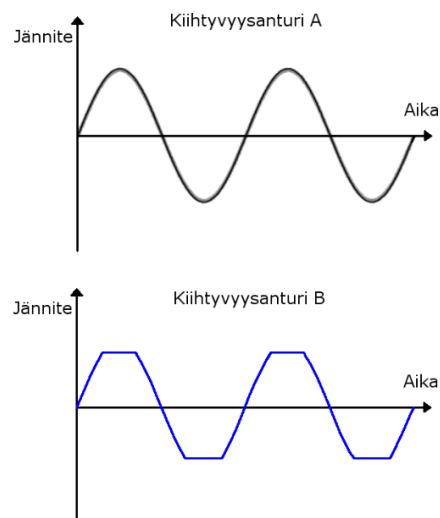
lämpötilayksikköä kohden ($\%/^{\circ}\text{C}$), jos se käyttäytyy lineaarisesti koko käyttölämpötila-alueella.



Kuva 22. Vasteen lämpötilariippuvuuden kuvaaja. Kuvaajassa pystyakselilla on herkkyyden poikkeama ja vaaka-akselilla on lämpötila.

7.8 Dynaaminen mittausalue

Värähtelyn amplitudin ylittäessä kiihtyvyysanturin dynaamisen mittausalueen anturin varausvahvistin saturoituu. Tämä aiheuttaa signaaliin vääristymää tai suurta epätarkkuutta, jolloin tulossignaalin tarkka mittaaminen on mahdotonta. Kuvassa 23 on esitetty kaksi kuvitteellista kiihtyvyysanturia, joilla mitataan saman suuruista värähtelyä. Kuvassa yläpuolella on esitetty kiihtyvyysanturin A lähtösignaali, jossa anturin dynaamista mittausaluetta ei ole ylitetty. Kuvassa alapuolella on esitetty kiihtyvyysanturin B lähtösignaali, jossa anturin dynaaminen mittausalue on ylitetty, jolloin signaalista jää olennaista tietoa pois. (Levinzon 2015, s. 9; Wilson 2005, s. 2-3)



Kuva 23. Kiihtyvyysanturi A ja B, joilla mitataan saman suuruista värähtelyä. Anturin A dynaamista mittausaluetta ei ole ylitetty. Anturin B dynaaminen mittausalue on ylitetty.

8 TESTIMITTAUKSET

Testimittauksien tavoitteena oli tarkastella, miten langattomalla tiedonsiirrolla toimiva kapasitiivinen MEMS-kiihtyvyysanturi toimii verrattuna perinteiseen kaapeloituun IEPE-kiihtyvyysanturiin. Kaikki testimittaukset suoritettiin Oulun yliopistossa tiistaina 30.6.2020.

8.1 Mittauksissa käytetyt anturit

RuuviTag (Ruuvi 2020) on suomalaisen startup-yrityksen Ruuvin valmistama, avoimella lähdekoodilla toimiva laite. Sillä voidaan mitata lämpötilaa, ilmankosteutta ja -painetta sekä kiihtyvyyttä. RuuviTag on alun perin suunniteltu kuluttajatuotteeksi eikä käytettäväksi kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa.

Testimittauksissa käytettiin RuuviTagin sisältämää STMechatronicsin LIS2DH12 kapasitiivista MEMS-kiihtyvyysanturia. LIS2DH12-anturin hinta on euron luokkaa ja sen pääasialliset käyttökohteet ovat muun muassa anturin liikesuunnan näyttäminen ja iskujen tunnistaminen.

LIS2DH12-kiihtyvyysanturi käyttää kahden komplementtista heksadesimaalijärjestelmää, jonka numerot kattavat 255 kymmenkantalukua. Anturin numerot (digit) voivat tällöin olla väliltä 00_{16} ja FF_{16} (-128_{10} ja $+127_{10}$). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että numeron muutos kuvastaa anturilla mitatun kiihtyvyyssignaalin muutosta.

LIS2DH12-kiihtyvyysanturin dynaaminen mittausalue skaalautuu automaattisesti, kun värähtelyn voimakkuus ylittää tietyn rajan. Sen dynaaminen mittausalue on datalehtisen mukaan $\pm 2,0$ g, $\pm 4,0$ g, $\pm 8,0$ g tai $\pm 16,0$ g. Tällöin anturin erottelukyky on joko 15,8 mg, 31,7 mg, 63,5 mg tai 127,0 mg.

RuuviTag on rakennettu lieriön muotoisen muovisen kotelon sisälle. Jotta RuuviTag voitiin kiinnittää testijärjestelyyn, sille valmistettiin alumiinista erillinen aluslevy, jossa on kierrereikä. Aluslevy ja RuuviTag kiinnitettiin toisiinsa Loctite 454 pikaliimalla, jonka annettiin jähmettyä 48 tunnin ajan. Aluslevy painoi 25 grammaa, jolloin anturin ja aluslevyn yhteispainoksi muodostui 50 grammaa.

CMSS 726 on ruotsalaisen teollisuusyrityksen SKF:n jälleenmyymä pieni ja kevyt IEPE-kiihtyvyysanturi, joka on suunniteltu pienien rakenteiden värähtelyn mittaamiseen. Se valittiin vertailtavaksi anturiksi, koska sen amplitudi- ja taajuusalue ovat laajemmat kuin RuuviTagilla. Tämän lisäksi sen paino on hyvin lähellä RuuviTagin painoa ilman aluslevyä. CMSS 726:n nimellisherkkyyys on 100 mV/g. CMSS 726:n datalehtinen on esitetty liitteessä 1. Anturin datalehtisessä on virheellisesti ilmoitettu kiinnitetyn anturin resonanssitaajuudeksi 132 kHz, kun todellisuudessa se on 32 kHz.

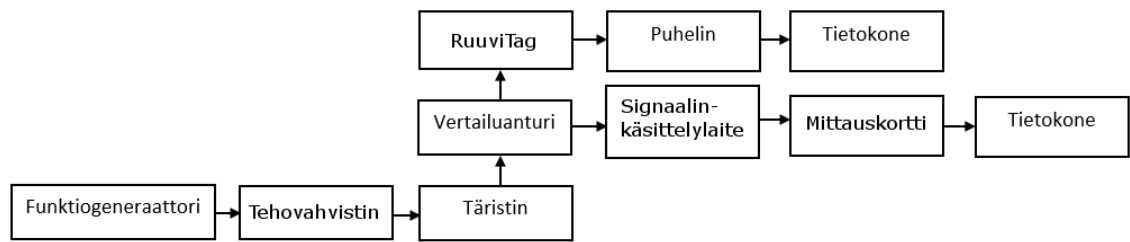
Molempien tutkittavien antureiden mittauksissa käytettiin vertailuanturina tanskalaisen tekniikka- ja elektroniikkayrityksen Brüel & Kjærin valmistamaa kiihtyvyysanturia Type 8305S (Brüel & Kjær 2020). Se on varaustulon tuottava pietsosähköinen kiihtyvyysanturi, joka vaatii ulkoisen varausvahvistimen, jolla vahvistetaan ja muutetaan varaussignaali jännitesignaaliksi. Type 8305S-kiihtyvyysanturi on suunniteltu käytettäväksi vertailuanturina kalibroinnissa, joten siinä on kaksi kiinnityspintaa, joista toiseen voitiin kiinnittää tutkittava anturi ruuvikiinnityksellä. Anturin herkkyys on 1,23 pC/g.

8.2 Mittausjärjestelyt

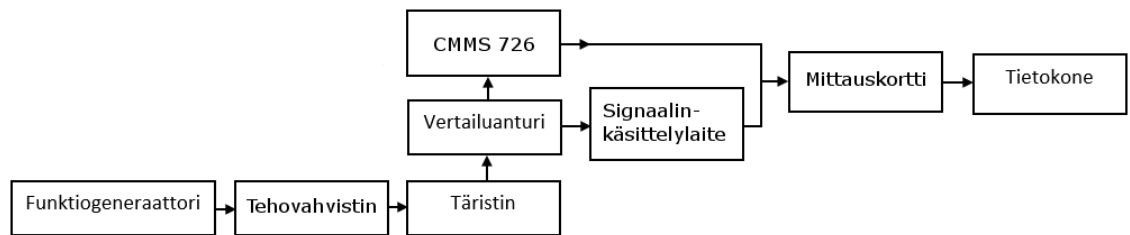
Testimittauksien värähtely- ja kohinatasomittaukset suoritettiin erillisillä mittausjärjestelyillä. Molemmat mittaukset suoritettiin samassa tilassa, jonka lämpötila oli 22,6 °C.

8.2.1 Värähtelymittaukset

Testimittauksen värähtelymittaukset suoritettiin kuvien 24 ja 25 lohkokaavioiden mukaisesti. Molemmissa mittauksissa täristimen värähtelyn taajuutta ja amplitudia ohjattiin funktiogeneraattorin avulla, jonka tuottama signaali vahvistettiin tehovahvistimella täristimelle sopivaksi. Testimittauksissa anturin varaussignaalin käsitteli Brüel & Kjærin Type 2692-A-014-tehovahvistin (Brüel & Kjær 2020). Vertailusignaalia vahvistettiin siten, että sen ulostulosignaalin herkkyys oli $10 \text{ mV} / \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ eli 98.1 mV/g. Vertailuanturi kiinnitettiin täristimeen ruuvikiinnityksellä.



Kuva 24. Lohkokaavio RuuviTagin värähtelymittausjärjestelystä.



Kuva 25. Lohkokaavio CMSS 726-kiihtyvyysanturin värähtelymittausjärjestelystä.

Kaikki mittaukset suoritettiin tukevan kivipöydän päällä, jotta ympäristöstä mahdollisesti aiheutuva värähtely vaimenisi mahdollisimman paljon. Kivipöydän päällä ei ollut täristimen ja antureiden lisäksi muita laitteita. Värähtelymittauksien täristimenä toimi Brüel & Kjærin Type 4810 (Brüel & Kjær 2020). Kuvissa 26 ja 27 on esitetty, miten anturit olivat kiinnitettyinä värähtelymittauksissa.



Kuva 26. RuuviTag päällimmäisenä kiinnitettynä Type 8305S-vertailuanturiin ja täristimeen.



Kuva 27. CMSS 726-kiihtyvyysanturi päällimmäisenä kiinnitettynä Type 8305S-vertailuanturiin ja täristimeen.

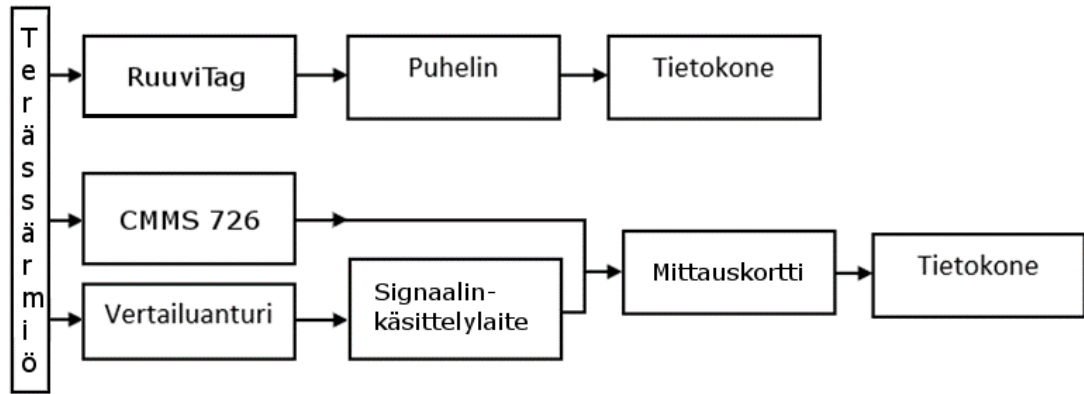
Testimittauksien tehovahvistimena toimi Brüel & Kjærin Type 2718 (Brüel & Kjær 2020) ja funktiogeneraattorina Hewlett-Packardin 33120A (Keysight technologies 2020). Funktiogeneraattori, tehovahvistin ja signaalinkäsittelylaite olivat erillisellä pöydällä täristimestä ja antureista testimittausten aikana.

Vertailuanturilta ja varausvahvistimen kautta saapuva signaali mitattiin National Instrumentsin NI 9234-mittausmoduulilla (National instruments 2020), joka sisältää muun muassa A/D-muuntimen, laskostumisenestosuodatuksen ja virransyötön. NI 9234-mittausmoduulin A/D-muunnin muuntaa analogisen jännitesignaalin digitaaliseen muotoon. NI 9234-mittausmoduuli kiinnitettiin NI cDAQ-9171 USB-koteloon (National instruments 2020), joka kiinnitettiin USB-johdolla kannettavaan tietokoneeseen. Tietokoneessa käytettiin LabVIEW-ohjelmaa kiihtyvyysantureiden värähtelydatan tarkasteluun ja tallentamiseen. Mittausmoduuli oli USB-kotelon sisällä tietokoneen takana erillisellä pöydällä täristimestä ja antureista.

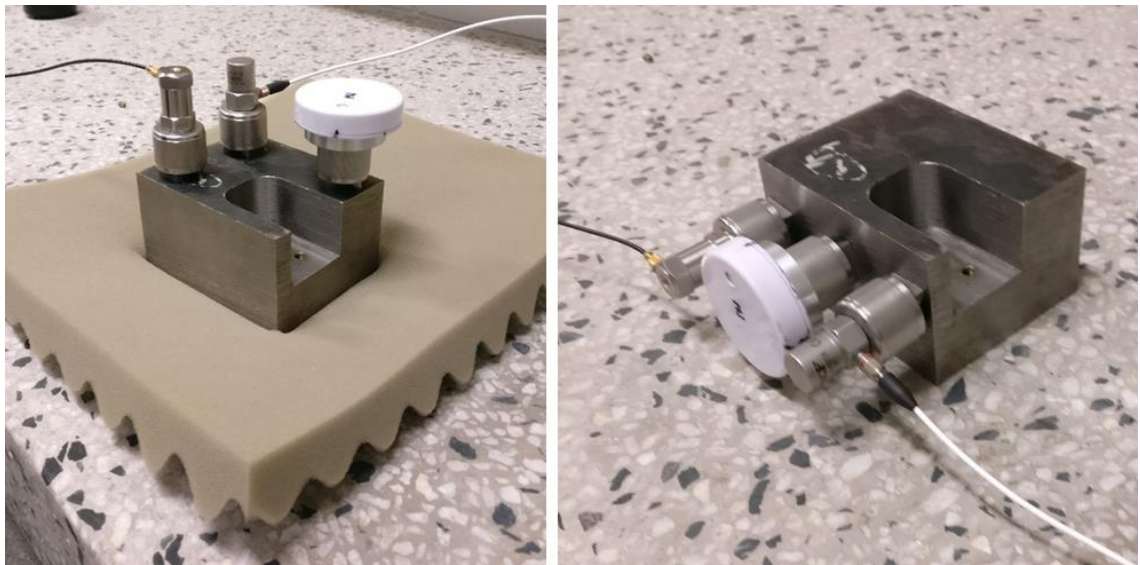
8.2.2 Kohinatasomittaukset

Kohinatasomittauksissa antureiden kiinnitykseen käytettiin magneettikiinnitystä. Anturit kiinnitettiin noin kahden kilogramman painoiseen teräksestä valmistettuun särmiöön. Kun antureiden kohinaa mitattiin niiden ollessa pystyasennossa, terässärmiö lepäsi parin senttimetrin paksuisen vaahtomuovin päällä. Vaahtomuovia ei ollut terässärmiön alla, kun antureiden kohinatasoja mitattiin niiden ollessa vaaka-asennossa. RuuviTagin x-

akseli osoitti maata kohti, kun antureiden kohinatasoja mitattiin vaaka-asennossa. Kuvassa 28 on esitetty kohinatasojen mittausjärjestelyiden lohkokaavio. Kuvasta 29 nähdään antureiden kiinnitykset pysty- sekä vaaka-asennossa kohinatasomittauksissa. Vasemmalla kuvassa anturit ovat pystyasennossa ja oikealla anturit ovat vaaka-asennossa.



Kuva 28. Lohkokaavio antureiden kohinatasomittausjärjestelyistä.



Kuva 29. Antureiden kohinatasomittaukset. Vasemmalla kuvassa kohinatasomittaukset suoritettiin antureiden ollessa pystyasennossa ja oikealla mittaukset suoritettiin antureiden ollessa vaaka-asennossa.

8.3 Testimittausten suorittaminen ja mittausjärjestelyiden välinen vertailu

Testimittaukset suoritettiin laajalla taajuusalueella sekä pääsääntöisesti kahdella eri amplitudilla. Kaikki taajuudet ja amplitudit, joilla värähtely- sekä kohinatasomittaukset suoritettiin, on esitetty taulukossa 2. Mittaus 21 mitattiin ainoastaan RuuviTagilla ja mittaus 22 mitattiin ainoastaan CMSS 726:lla.

Taulukko 2. Testimittauksissa mitatut taajuudet ja amplitudit sekä kohinatasomittaukset.

#	Amplitudi (m/s^2)	Taajuus (Hz)	#	Amplitudi (m/s^2)	Taajuus (Hz)	#		
1	1	10	14	40	40	27	Pystysuunta	Kohina
2	10	20	15	40	80	28	Vaakasuunta	Kohina
3	10	40	16	40	160			
4	10	80	17	40	320			
5	10	160	18	40	640			
6	10	320	19	40	960			
7	10	640	20	40	1280			
8	10	960	21	40	1920			
9	10	1280	22	40	2560			
10	10	1920	23	40	3840			
11	10	2560	24	40	5120			
12	10	3840	25	20	1280			
13	10	5120	26	30	1280			

CMSS 726:n ja RuuviTagin mittausten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi vertailtiin vertailuanturin signaaleista laskettujen tehollisarvojen sekä pistetaajuuksien arvoja eri mittausjärjestelyjen kesken. Mittausten väliseen vertailukelpoisuuteen voi vaikuttaa muun muassa lämpötilan vaihtelu.

Taulukkoon 3 on listattu vertailuanturilla mitattujen aikatasosignaalien tehollisarvot. Lisäksi taulukossa on esitetty prosentteina, kuinka paljon aikatasosignaalien tehollisarvot poikkesivat toisistaan eri mittausjärjestelyiden välillä. Mittausjärjestelyiden välisistä poikkeavuuksista huomattiin, että suurin eroavaisuus vertailuanturilta mitattujen aikatasosignaalien tehollisarvojen välillä oli mittauksessa 1. Mittausjärjestelyiden välinen eroavaisuus oli -3,637 % mittauksessa 1.

Taulukko 3. Mittausjärjestelyiden välinen eroavaisuus vertailuanturilta mitatun aikatasosignaalin tehollisarvojen suhteen.

Mittaus (#)	Ruuvitagin mittausjärjestelyn vertailuanturin aikatasosignaalin tehollisarvo (m/s^2)	CMSS 726:n mittausjärjestelyn vertailuanturin aikatasosignaalin tehollisarvo (m/s^2)	Mittausjärjestelyiden välinen eroavaisuus vertailuanturin aikatasosignaalin tehollisarvojen suhteen (%)
1	1.003	1.040	-3.637
2	10.089	9.883	2.080
3	10.004	9.984	0.198
4	10.039	10.028	0.113
5	10.082	10.015	0.669
6	10.003	9.981	0.224
7	10.077	9.980	0.977
8	9.927	10.037	-1.094
9	10.033	9.980	0.528
10	10.038	10.041	-0.027
11	10.089	9.965	1.244
12	10.020	9.959	0.608
13	9.988	9.973	0.155
14	39.915	40.079	-0.410
15	39.839	39.960	-0.303
16	39.909	39.908	0.001
17	39.864	39.945	-0.202
18	39.927	40.003	-0.189
19	39.923	39.958	-0.088
20	39.724	39.987	-0.659
21	39.948		
22		40.000	
23	39.991	40.016	-0.063
24	40.007	40.002	0.013
25	19.918	20.060	-0.706
26	29.850	30.003	-0.510

Taulukkoon 4 on listattu vertailuanturilla mitattujen taajuusspektrien pistetaajuudet. Lisäksi taulukossa on esitetty prosentteina, kuinka paljon taajuusspektrien pistetaajuudet poikkesivat toisistaan mittausjärjestelyiden välillä. Tarkoituksena oli tarkastella täristimen tuottaman värähtelyn taajuutta eri mittausjärjestelyiden välillä. Taulukosta nähdään, ettei vertailuanturilta mitattujen taajuusspektrien pistetaajuuksien välisiä eroavaisuuksia ollut eri mittausjärjestelyiden välillä.

Taulukko 4. Mittausjärjestelyiden välinen eroavaisuus vertailuanturilta mitatun taajuusspektrin pistetaajuuksien suhteen.

Mittaus (#)	Ruuvitagin mittausjärjestelyn vertailuanturin taajuusspektrin pistetaajuus (Hz)	CMSS 726:n mittausjärjestelyn vertailuanturin taajuusspektrin pistetaajuus (Hz)	Mittausjärjestelyiden välinen eroavaisuus vertailuanturin taajuusspektrin pistetaajuuksien suhteen (%)
1	10.11	10.11	0
2	19.87	19.87	0
3	40.08	40.08	0
4	80.17	80.17	0
5	160	160	0
6	320	320	0
7	640	640	0
8	960	960	0
9	1280	1280	0
10	1920	1920	0
11	2560	2560	0
12	3840	3840	0
13	5120	5120	0
14	40.08	40.08	0
15	79.83	79.83	0
16	160	160	0
17	320	320	0
18	640	640	0
19	960	960	0
20	1280	1280	0
21	1920		
22		2560	
23	3840	3840	0
24	5120	5120	0
25	1280	1280	0
26	1280	1280	0

Aikatasosignaalien tehollisarvojen ja taajuusspektrien pistetaajuuksien eroavaisuudet olivat lopputulosten kannalta merkityksettömän pieniä mittausjärjestelyiden välillä, joten kompensointia ei ollut tarvetta suorittaa. Tämä tarkoitti sitä, että jatkossa työssä vertailtiin RuuviTagin ja CMSS 726:n tuloksia suoraan keskenään.

8.4 RuuviTag-anturin testimittausten analysointi

RuuviTag siirsi mitattua dataa bluetoothin avulla matkapuhelimeen. Puhelimesta data siirrettiin tietokoneelle, jossa se käsiteltiin tekstinkäsittelyohjelmalla, käyttäen ”etsi ja korvaa” -komentoa, liitteen 2 ohjeiden mukaisesti. Työssä tekstinkäsittelyohjelmana oli käytössä Sublime Text 3. RuuviTagissa on automaattinen dynaamisen mittausalueen skaalan valinta, jonka arvo täytyi tarkastaa jokaisen mittauksen kohdalla yksilöllisesti. Mittauksen skaala näkyi ”00-00-F0” alkavalla rivillä, kolmanneksi viimeisellä tavulla. Lopullisessa muodossa data oli kolmen tavun riveissä pilkuilla eriteltyinä, jolloin sitä voitiin analysoida Matlabin avulla, kun se tallennettiin .csv (comma-separated values) muotoon.

Matlabissa aika- ja taajuustason muodostamiseen käytettiin kuvan 30 mukaisia komentoja. ”TIEDOSTON_NIMI.csv” tilalle kirjoitettiin tutkittavan mittauksen tiedostonimi. Tällöin Matlab piirsi tutkittavan signaalin aika- ja taajuustasoon.

Sisäisesti RuuviTag otti näytteitä 5376 Hz taajuudella. Näistä näytteistä RuuviTag tallensi joka toisen, jolloin näytteenottotaajuus oli 2688 Hz. Koska RuuviTag tallensi joka toisen näytteen, syntyi kappaleessa 2.7.4 käsitellyn Nyquistin teoreeman mukaan mahdollinen riski signaalin laskostumiselle. RuuviTag otti yhteensä 8000 näytettä ja poisti ensimmäiset ja viimeiset 10 näytettä. Tästä syystä mittausten aikajana alkoi vasta 11 näytteen kohdalta, jonka komennot näkyvät kuvassa 30 rivillä 24. Tämän lisäksi RuuviTagilta tuleva kiihtyvyydata oli mg/numero (mg/digit) muotoa, josta se tuli muuttaa yksikköön m/s^2 , jotta antureiden mittaukset olivat helposti vertailtavissa. Kuvassa 30 riveillä 6-13 kiihtyvyydata muunnettiin yksikköön g ($=9,81 m/s^2$) ja rivillä 15 se muunnettiin yksikköön m/s^2 .

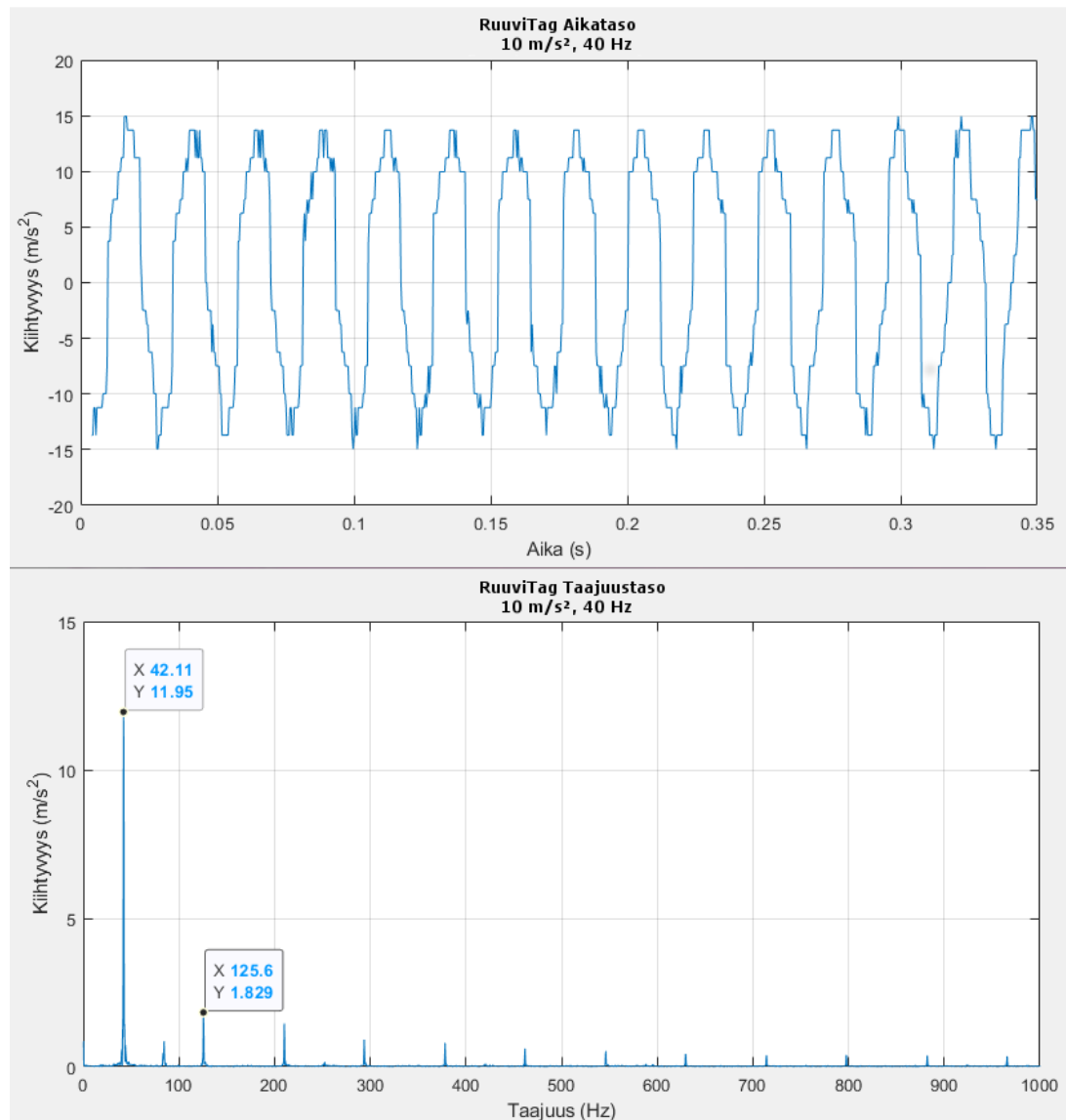
```

1  % Muunnetaan anturilta saadut heksadesimaalit desimaaleiksi
2  filename = "TIEDOSTON_NIMI.csv";
3  data = hex2dec(string(readcell(filename)));
4  [rows,cols] = size(data);
5
6  for i=1:rows
7      for j=1:cols
8          if(data(i,j) > 127)
9              data(i,j) = (data(i,j) - 256);
10             end
11             data(i,j) = -data(i,j) / 126 * 8; % Viimeinen numero tarkoittaa skaalaa 2G/4G/8G/16G
12         end
13     end
14
15     varahtely = data(1:end,3)*9.81; % Valitaan taulukosta värähtelydata.
16     % 1=x-akseli, 2=y-akseli, 3=z-akseli
17     Fs = 2688; % Näytteistystaajuus
18     N = 7980; % Näytteiden lukumäärä
19     aika = ((N/Fs)/N):(N/Fs)/N:(N/Fs)'; % Luodaan aikajana mittauksille
20     RuuviTag_rms = rms(varahtely); % Lasketaan kiihtyvyyden tehollisarvo
21
22     % Piirretään aikataason kuvaaja
23     figure(1)
24     plot(aika(11:rows+10),varahtely); % Aikajana alkaa vasta 11 näytteen kohdalta
25     xlabel('Aika (s)');
26     ylabel('Kiihtyvyys (m/s^2)');
27     filename = strrep(filename, '_', '-');
28     title(['RuuviTag Aikataso ',filename]);
29     grid on;
30
31     hann = hann(N); % Tehdään Hanning ikkuna
32     hann = hann.*varahtely*2; % Kerrotaan ikkunafunktio värähtelydataan
33     freq = 0:Fs/N:Fs/2; % Taajuusmatriisi FFT laskemista varten
34     xdft = fft(hann); % Lasketaan FFT
35     xdft = 1/N.*xdft; % Normalisointi
36     xdft(2:end-1) = 2*xdft(2:end-1);
37
38     % Piirretään taajuustason kuvaaja
39     figure(2)
40     plot(freq,abs(xdft(1:floor(N/2)+1)))
41     xlabel('Taajuus (Hz)');
42     ylabel('Kiihtyvyys (m/s^2)');
43     title(['RuuviTag Taajuustaso',filename]);
44     grid on;

```

Kuva 30. Matlab komennot RuuviTagilla mitatun värähtelydatan esittämiseksi aika- ja taajuustasossa.

Ennen DFT:n soveltamista värähtelydata ikkunoitiin Hanning-ikkunalla. Tämä tapahtui kuvan 30 koodissa rivillä 32. Edellä mainitut toimet tehtiin jokaiselle mittaukselle. Kuvassa 31 on esitetty RuuviTagin mitaamat arvot käyttämällä kuvan 30 komentoja, kun tärhistimen tuottaman ja vertailuanturilla mitatun aikatasosignaalin tehollisarvo oli 10 m/s^2 ja taajuus oli 40 Hz . Kuvassa 31 aikatasosignaalista on esitetty vain osa sen koko pituudesta. Spektrin laskemiseen käytettiin kuitenkin kaikkia 7980 mitattua näytettä.



Kuva 31. RuuviTagilla mitattu signaali aika- ja taajuustasossa, kun vertailuanturilla mitatun kiihtyvyyssignaalin taajuus oli 40 Hz ja aikatasosignaalin tehollisarvo oli 10 m/s^2 . Aikatasosignaalista on esitetty vain osa sen koko pituudesta.

8.5 CMSS 726-kiihtyvyyssanturin testimittausten analysointi

Mittakortti otti CMSS 726:n tuottamasta signaalista 256 000 kappaletta näytteitä 25.6 kHz taajuudella. Tallennettuna data oli tekstimuodossa, jossa ensimmäisellä sarakkeella oli aika, jolloin näyte oli otettu. Seuraavilla sarakkeilla oli antureiden avulla mitatut kiihtyvyydet kyseisellä ajanhetkellä.

Matlabissa aika- ja taajuustason kuvaajien muodostamiseen käytettiin kuvan 32 mukaisia komentoja. ”TIEDOSTON_NIMI” tilalle kirjoitettiin tutkittavan mittauksen tiedostonimi, jolloin Matlab piirsi tutkittavan mittauksen signaalin aika- ja taajuustasoon. CMSS 726:n ja RuuviTagin taajuusspektrin vertailukelpoisuuden saavuttamiseksi täytyi

molempien spektrien mittaustarkkuuden olla sama. Tämä saavutettiin, kun 256000 näytteen sijaan CMSS 726:n värähtelydatasta otettiin 76000 näytettä. Kuvassa 32 rivillä 5 CMSS 726:n värähtelydatasta otettiin 76000 näytettä ja rivillä 6 otettiin 76000 näytteen mittaukseen kulunut aika. Edellä mainitut toimet tehtiin jokaiselle mittaukselle.

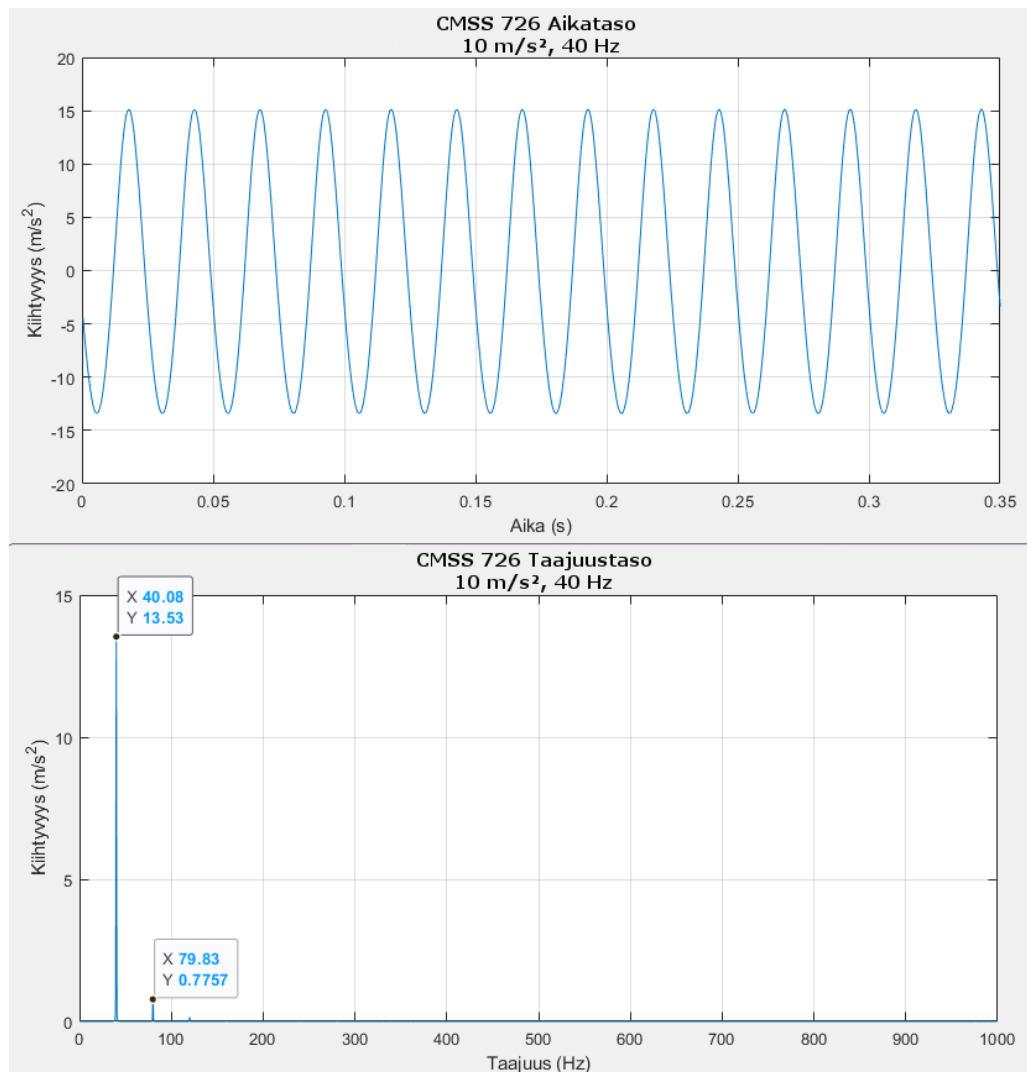
```

1 - filename = 'TIEDOSTON_NIMI';
2 - data = string(readcell(filename));
3 - % Otetaan värähtelydatan taulukosta: 2 = vertailuanturi, 3 = CMSS 726
4 - CMSS726_varahtely = data(34:76033,3);
5 - aika = data(34:76033,1); % Otetaan ajat taulukosta.
6 - % Muutetaan pilkut pisteiksi, jotta matlab osaa seuraavassa vaiheessa muodostaa numerot oikein
7 - CMSS726_varahtely = strrep(CMSS726_varahtely, ',', '.');
8 - CMSS726_varahtely = str2double(CMSS726_varahtely);
9 - aika = strrep(aika, ',', '.');
10 - aika = str2double(aika);
11 - filename = strrep(filename, '_', ' ');
12 - filename = filename(1:end-16);
13
14 - CMSS726_aikatason_rms = rms(CMSS726_varahtely);
15
16 - figure(1)
17 - plot(aika, CMSS726_varahtely);
18 - xlabel('Aika (s)');
19 - ylabel('Kiihtyvyys (m/s^2)');
20 - title(['CMSS 726 Aikataso', filename]);
21 - grid on;
22
23 - Fs = 25600;
24 - N = 76000;
25
26 - hann = hann(N); % muodostetaan Hanning ikkunafunktio
27 - hann3 = hann.*varahtely_CMSS726*2; % Kerrotaan ikkunafunktio värähtelydataan
28
29 - freq = 0:Fs/N:Fs/2; % Taajuusmatriisi FFT laskemista varten
30 - xdft = fft(hann3); % Lasketaan FFT
31 - xdft = 1/N.*xdft; % Normalisointi
32 - xdft(2:end-1) = 2*xdft(2:end-1);
33
34 - figure(2)
35 - plot(freq,abs(xdft(1:floor(N/2)+1)))
36 - xlabel('Taajuus (Hz)');
37 - ylabel('Kiihtyvyys (m/s^2)');
38 - title(['CMSS 726 Taajuustaso', filename]);
39 - grid on;

```

Kuva 32. Matlab komennot CMSS 726:lla mitatun värähtelydatan esittämiseen aika- ja taajuustasossa.

Värähtelydatalle suoritettiin Hanning-ikkunointi ennen DFT:n soveltamista. Ikkunointi suoritettiin kuvan 32 koodissa rivillä 26. Kuvan 32 komennot suoritettiin jokaiselle mittaukselle. Kuvassa 33 on esitetty CMSS 726-kiihtyvyysanturilla mitatut arvot, kun täristimen tuottaman ja vertailuanturilla mitatun värähtelyn tehollisarvo oli 10 m/s^2 ja taajuus oli 40 Hz. Kuvan 33 aikatasosignaalista on esitetty vain osa sen koko pituudesta. Spektrin laskemiseen käytettiin kuitenkin 76000 näytettä.



Kuva 33. CMSS 726:lla mitattu signaali aika- ja taajuustasossa, kun vertailuanturilla mitatun kiihtyvyyssignaalin taajuus oli 40 Hz ja tehollisarvo oli 10 m/s². Aikatasosignaalista on esitetty vain osa sen koko pituudesta.

Kuvassa 33 näkyvä CMSS 726:n aikatasosignaalin noin 1.5 m/s² epäsymmetrisyys nollatason suhteen mahdollisesti muodostui täristimen ominaisuuksien vuoksi. Täristin ei kyennyt muodostamaan täysin puhdasta aaltosignaalia alhaisilla taajuuksilla, jolloin mittauksiin syntyi kuvassa 33 näkyvä epäsymmetrisyys. CMSS 726-kiihtyvyyssanturin signaalin epäsymmetrisyys oli jo hävinnyt 80 Hz taajuudella suoritettun mittauksen kohdalla.

8.6 Värähtelymittausten tulokset

Tulosten avulla tarkasteltiin antureiden aikatasosignaalien tehollisarvoja, laskettiin antureiden herkkyys referenssipisteessä, muodostettiin antureiden taajuusvastekuvaajat sekä tutkittiin signaaleja taajuustasossa.

8.6.1 Aikatasosignaalin tehollisarvot ja taajuusspektrin pistetaajuudet

Aikatasosignaalien tehollisarvojen avulla laskettiin antureiden herkkyydet sekä taajuusvastekuvaajat. Taulukoihin 5 ja 6 on listattu RuuviTagilla ja CMSS 726-kiihtyvyysanturilla mitattujen signaalien aikatazon tehollisarvot ja taajuustason pistetaajuudet.

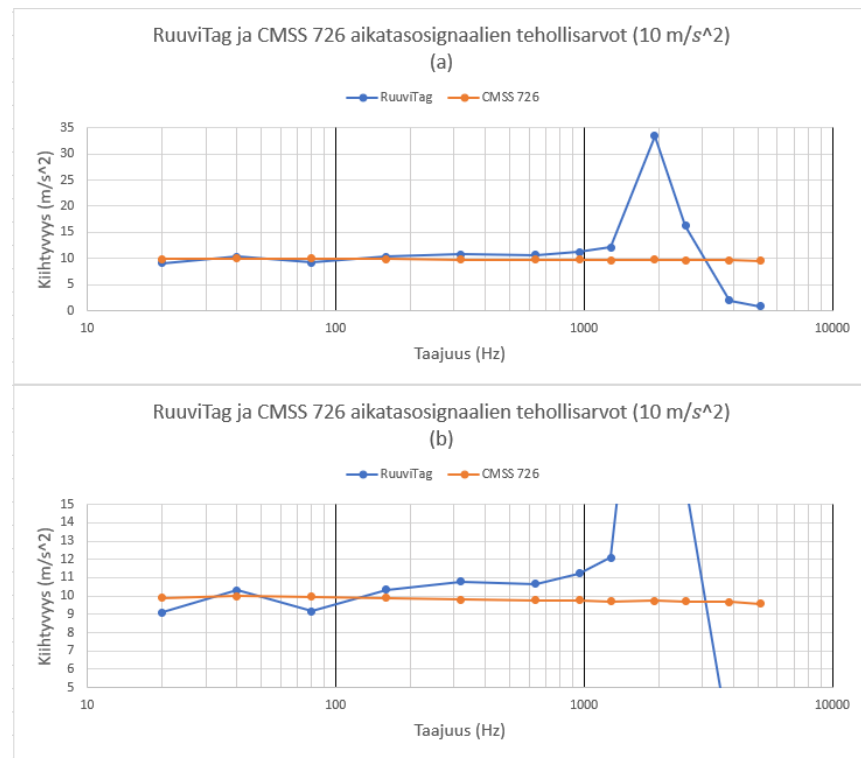
Taulukko 5. RuuviTag- ja CMSS 726-anturilla mitattujen aikatasosignaalien tehollisarvot.

Mittaus (#)	RuuviTagin signaalin tehollisarvo (m/s^2)	CMSS 726:n signaalin tehollisarvo (m/s^2)
1	1.418	1.047
2	9.112	9.906
3	10.314	9.987
4	9.161	9.968
5	10.331	9.905
6	10.784	9.804
7	10.659	9.762
8	11.242	9.784
9	12.083	9.707
10	33.465	9.738
11	16.210	9.695
12	1.970	9.671
13	0.848	9.579
14	40.132	40.041
15	34.037	39.722
16	39.968	39.532
17	43.701	39.256
18	42.653	39.138
19	45.578	38.973
20	47.558	38.918
21	104.480	
22		38.968
23	9.780	38.953
24	3.158	38.952
25	23.521	19.567
26	35.549	29.259

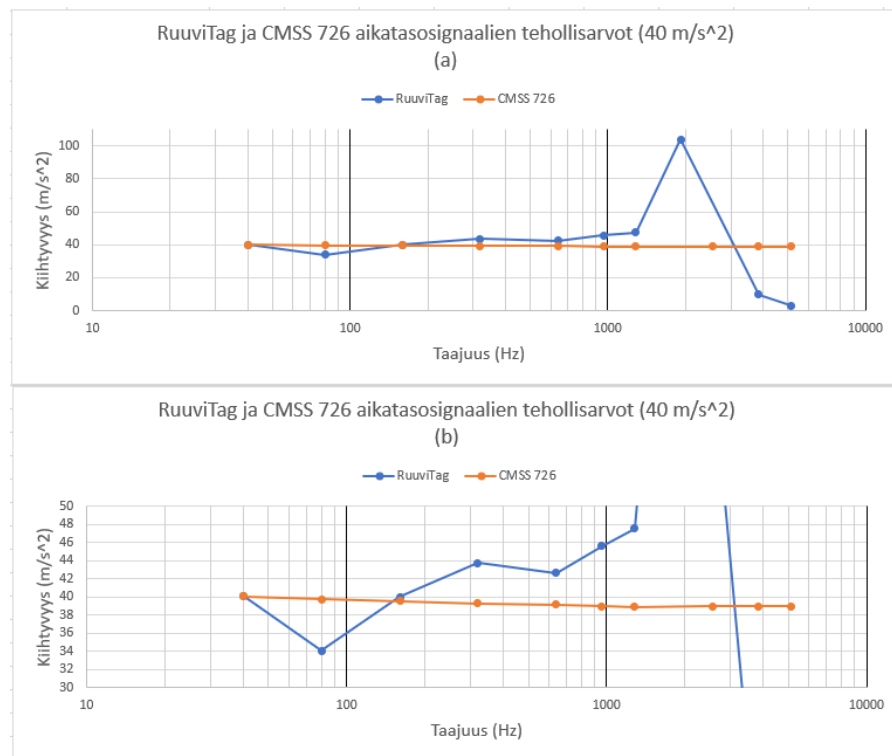
Taulukko 6. RuuviTag- ja CMSS 726-anturilla mitattujen signaalien pistetaajuudet taajuusspektristä.

Mittaus (#)	RuuviTagin pistetaajuus (Hz)	CMSS 726:n pistetaajuus (Hz)
1	10.44	10.11
2	20.88	19.87
3	42.11	40.08
4	84.55	79.83
5	165.4	160
6	163.7	320
7	353	640
8	528.5	960
9	691.5	1280
10	957.1	1920
11	1245	2560
12	696.9	3840
13	12.8	5120
14	42.11	40.08
15	83.87	80.17
16	166.7	160
17	163	320
18	352.7	640
19	516.1	960
20	708.7	1280
21	980.6	
22		2560
23	697.9	3840
24	24.62	5120
25	688.6	1280
26	704.9	1280

RuuviTagin ja CMSS 726:n aikatasosignaaleista lasketut tehollisarvot on esitetty kuvaajina kuvissa 34 ja 35. Kuvan 34 kuvaajan muodostamiseen käytettiin mittausten 2-13 aikatasosignaalien tehollisarvoja. Kuvan 35 kuvaajaan muodostamiseen käytettiin mittausten 14-24 aikatasosignaalien tehollisarvoja.



Kuva 34. RuuviTagin ja CMSS 726:n aikatasosta mitatut tehollisarvot, kun vertailuanurilla mitattujen kiihtyvyyssignaalien tehollisarvot olivat 10 m/s^2 : (a) kuvaajassa näkyy kaikki mitatut arvot; kuvaajassa (b) on kuvaaja (a) suurennettuna.



Kuva 35. RuuviTagin ja CMSS 726:n aikatasosta mitatut tehollisarvot, kun vertailuanurilla mitattujen kiihtyvyyssignaalien tehollisarvot olivat 40 m/s^2 : (a) kuvaajassa näkyy kaikki mitatut arvot; kuvaajassa (b) on kuvaaja (a) suurennettuna.

Tuloksista huomattiin, että täristimen tuottaman ja vertailuanturilla mitatun värähtelyn tehollisarvon ollessa 10 m/s^2 , RuuviTagin tehollisarvot erosivat noin $\pm 10 \%$ CMSS 726:n tehollisarvoista aina 640 Hz asti. 960 Hz alkaen RuuviTagin tehollisarvo poikkeama alkoi kasvamaan suuremmaksi.

Vertailuanturilla mitattujen kiihtyvyyssignaalien tehollisarvojen ollessa 40 m/s^2 , RuuviTagin tehollisarvot erosivat $\pm 15 \%$ CMSS 726:n tehollisarvoista 640 Hz asti. 960 Hz alkaen RuuviTagin tehollisarvojen poikkeama alkoi kasvamaan suuremmaksi. Mittausten perusteella RuuviTag-anturin ominaistaaajuus sijaitsee noin 1920 Hz kohdalla.

8.6.2 Antureiden herkkyydet

Antureiden taajuusvastekuvaajien piirtämiseksi selvitettiin antureiden herkkyydet. Ensimmäisenä selvitettiin antureiden herkkyydet referenssitaaajuudella (f_R). Taajuusvasteen referenssitaaajuutena käytettiin 40 Hz. RuuviTagin sekä CMSS 726:n herkkyydet referenssitaaajuuden kohdalta laskettiin käyttämällä seuraavaa kaavaa:

$$S = \frac{R_T}{E_{EU}} S_{Ref} \quad (12)$$

missä S on kiihtyvyyssanturin herkkyys [mV/g],
 R_T on mittausketjun vaste [m/s^2],
 E_{EU} on heräte [m/s^2] ja
 S_{Ref} on vertailuanturin herkkyys [mV/g].

Käyttämällä vertailuanturilta saatua kiihtyvyyttä taulukosta 3, herätteenä E_{EU} , saatiin laskemalla kaavan (12) mukaan referenssitaaajuudella RuuviTagin herkkyydeksi:

$$S = \frac{10,3139 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{10,004 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} 98,1 \frac{\text{mV}}{\text{g}} = 101,139 \frac{\text{mV}}{\text{g}}$$

CMSS 726:n herkkyydeksi saatiin:

$$S = \frac{9,987 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{9,984 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} 98,1 \frac{\text{mV}}{\text{g}} = 98,129 \frac{\text{mV}}{\text{g}}$$

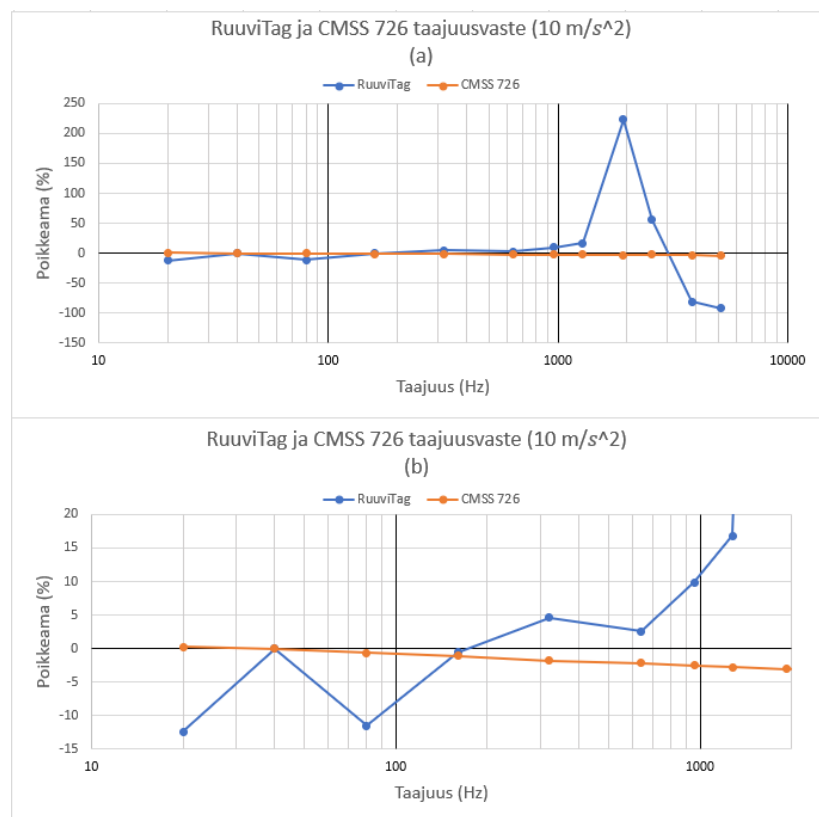
8.6.3 Antureiden taajuusvastekuvaajat

RuuviTagin ja CMSS 726:n lineaaristen taajuusalueiden selvittämiseksi muodostettiin molempien antureiden taajuusvastekuvaajat. Antureiden taajuusvastekuvaajat muodostettiin laskemalla herkkyyden muutos verrattuna referenssitaajuuden herkkyyteen. Anturin herkkyyden poikkeama laskettiin seuraavasti:

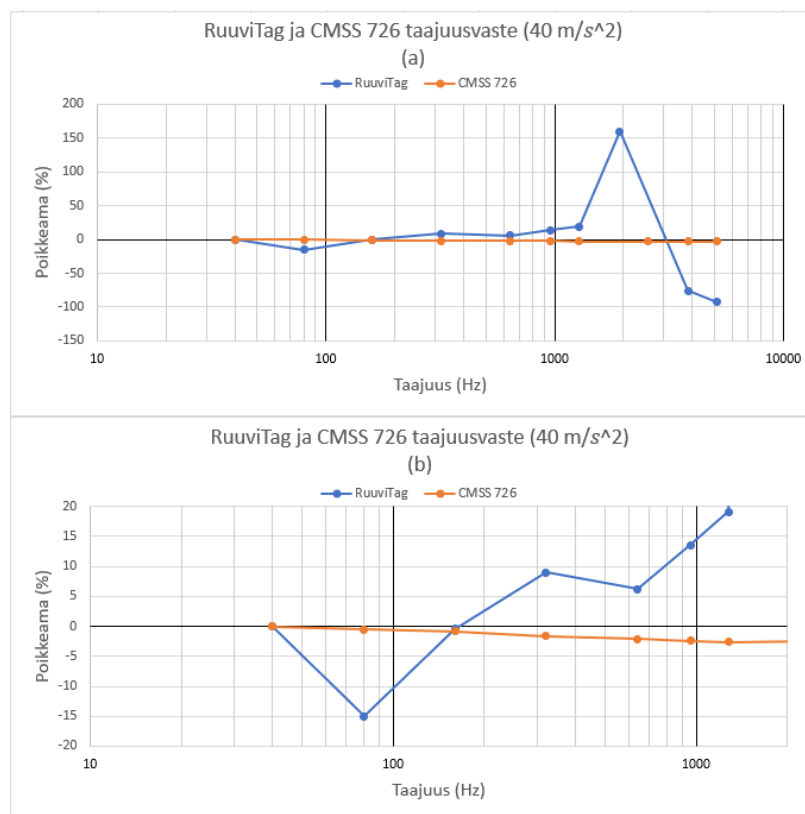
$$S_{\%} = \frac{S_f}{S_{f_R}} 100 \% - 100 \% \quad (13)$$

missä $S_{\%}$ on kiihtyvyyssanturin herkkyyden poikkeama [%],
 S_f on kiihtyvyyssanturin herkkyys vertailtavan taajuuden kohdalla [mV/g] ja
 S_{f_R} on kiihtyvyyssanturin herkkyys referenssitaajuudella [mV/g].

Laskemalla kaavan (13) mukaan herkkyyden poikkeama jokaisella taajuudella, saatiin muodostettua antureiden taajuusvastekuvaajat. Ne on esitetty kuvissa 36 ja 37.



Kuva 36. RuuviTagin ja CMSS 726:n taajuusvastekuvaaja, kun vertailuanturilla mitatut signaalin tehollisarvo oli 10 m/s²: (a) kuvaajassa näkyy kaikki mitatut arvot; kuvaajassa (b) on kuvaaja (a) suurennettuna.



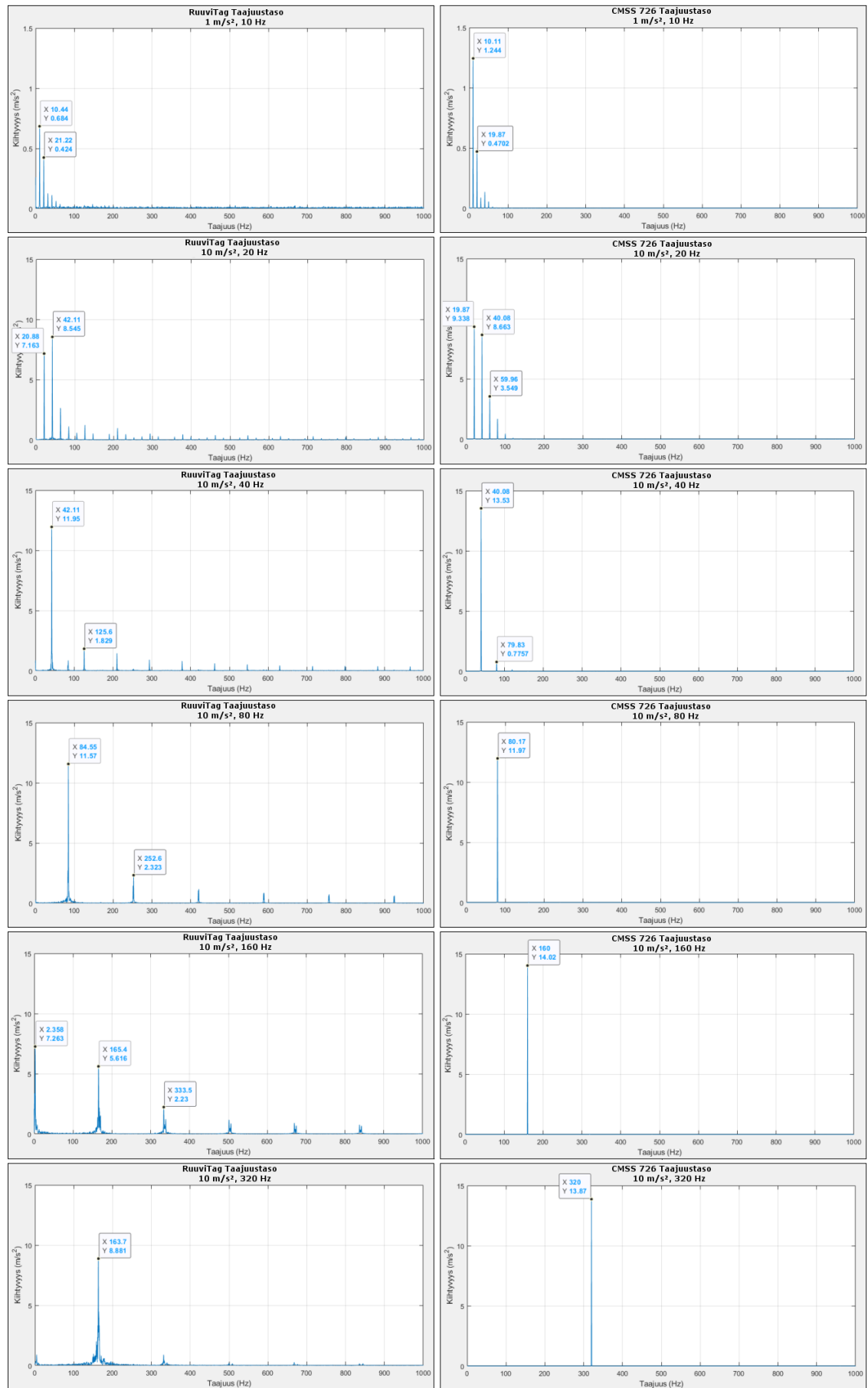
Kuva 37. RuuviTagin ja CMSS 726:n taajuusvastekuvaaja, kun vertailuanturilla mitatut signaalin tehollisarvo oli 40 m/s^2 : (a) kuvaajassa näkyy kaikki mitatut arvot; kuvaajassa (b) on kuvaaja (a) suurennettuna.

Kappaleissa 7.5 ja 7.6 käytiin läpi anturin taajuusvaste ja lineaarinen taajuusalue. Kuvien 36 ja 37 perusteella RuuviTagin taajuusvaste on $+30\%$ tarkkuudella lineaarinen $1\,300 \text{ Hz}$ asti. RuuviTagin taajuusvasteen -30% tarkkuuden lineaarisuutta ei pystytty määrittämään suoritetuilla mittauksilla. Myöskään CMSS 726:n taajuusvasteen $\pm 5\%$ tarkkuuden lineaarisuutta ei pystytty määrittämään suoritetuilla mittauksilla.

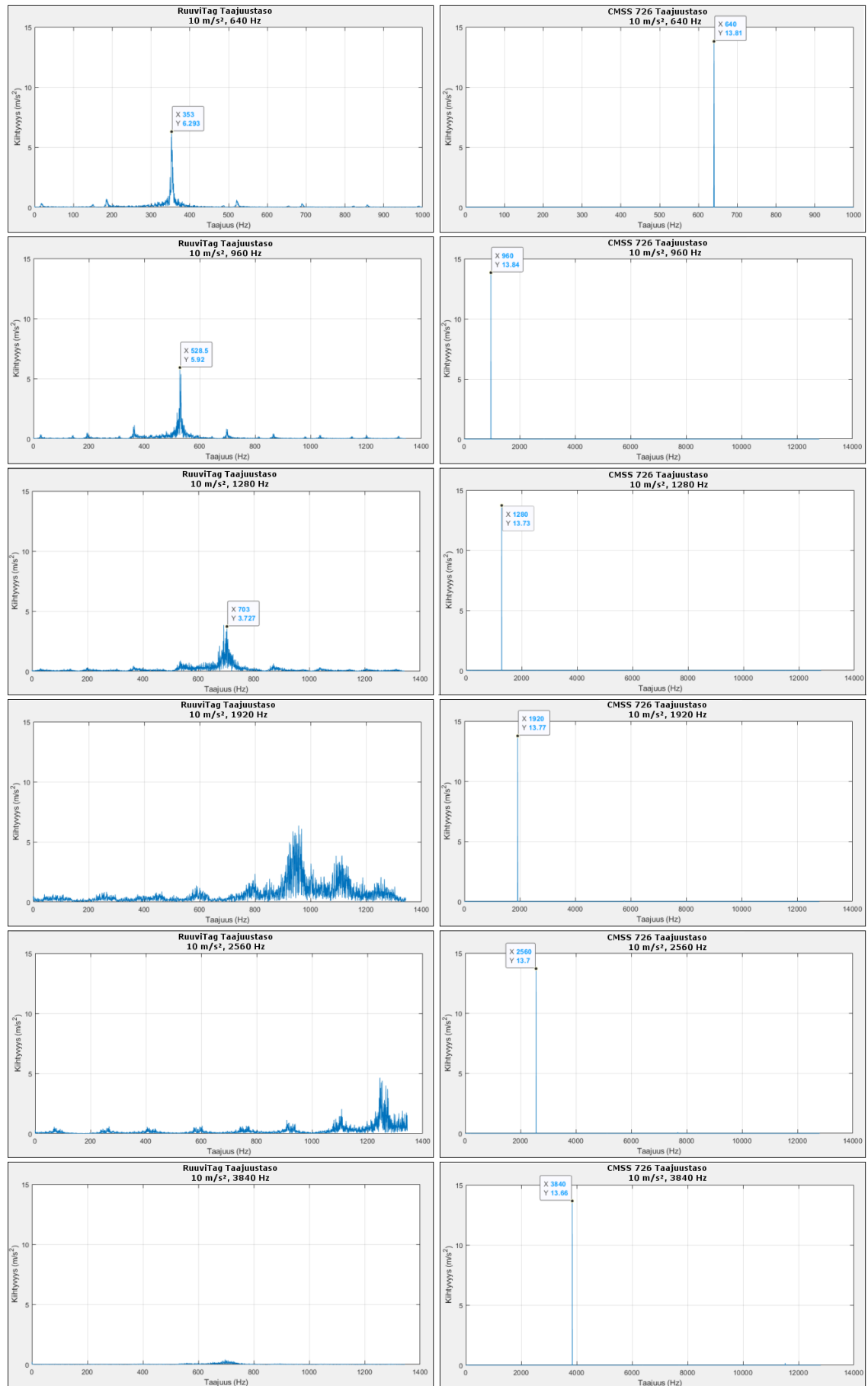
8.6.4 Taajuusspektrit

RuuviTagin mittausten 1-28 taajuusspektrit on esitetty kuvissa 38-42 vasemmalla puolella. 160 Hz kohdalla RuuviTagin taajuuskomponenttien amplitudi vaimeni huomattavasti ja spektriin aiheutui hiihtorinneilmiö. 320 hertsissä RuuviTagin suurimman taajuuskomponentin taajuus oli noin puolet verrattuna vertailuanturilla mitattuun taajuuteen. 640 , 960 ja 1280 hertsin mittauksissa RuuviTagin suurimman taajuuskomponentin taajuus oli noin 55% CMSS 726:lla mitattuun taajuuteen. Tämän lisäksi 320 hertsistä alkaen spektrissä esiintyi sivunauhat noin 168 Hz:n etäisyydellä molemmin puolin suurimmasta taajuuskomponentista.

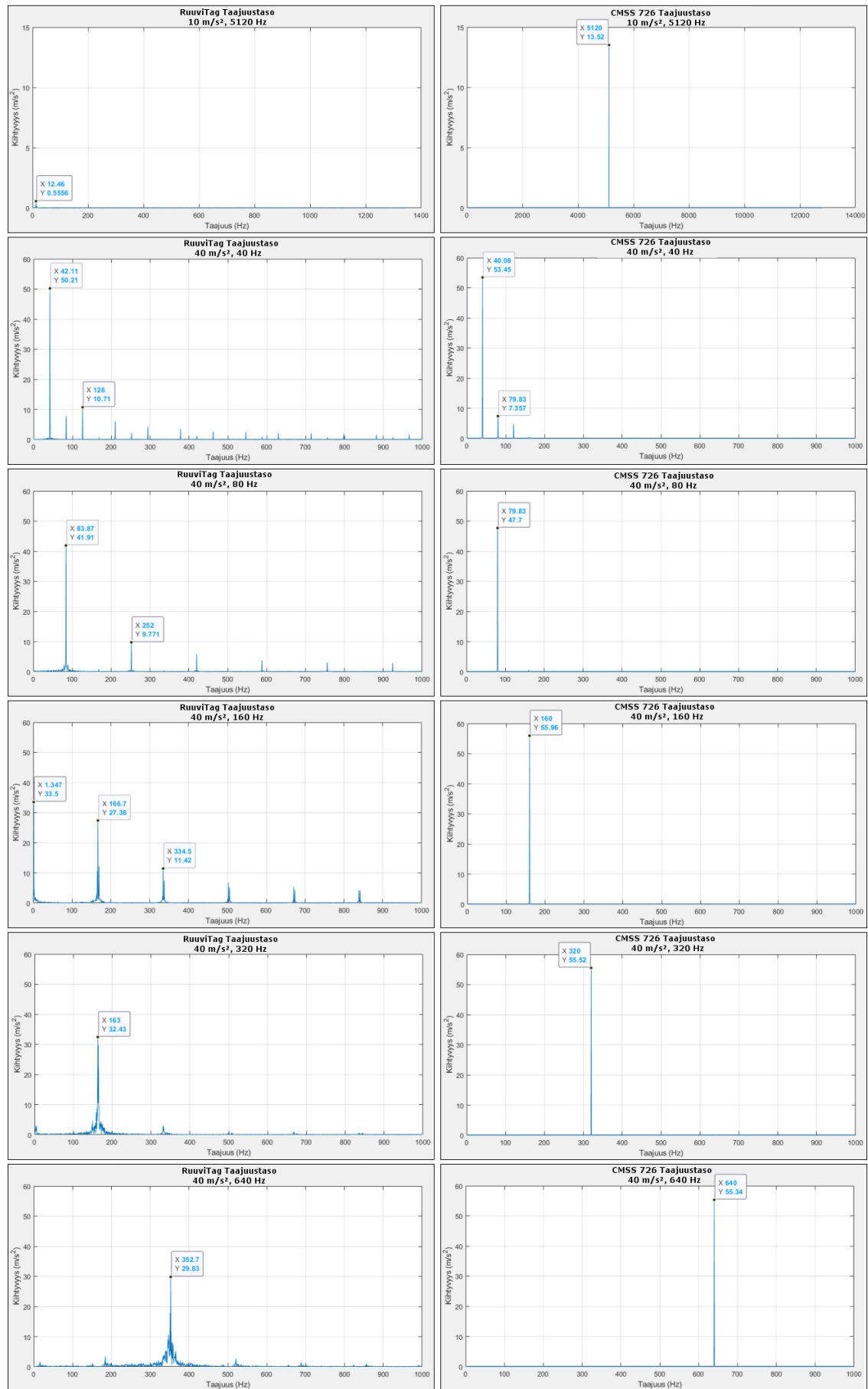
CMSS 726:lla mitattujen signaalien taajuusspektrit on esitetty kuvissa 38-42 oikealla puolella. CMSS 726:n mittauksissa esiintyi täristimen tuottaman taajuuden monikertoja 40 Hz asti, jonka jälkeen spektrissä esiintyi enää vain yksi selvä taajuuskomponentti. Monikerrat johtuvat siitä, että täristimen tuottama signaali ei ollut matalilla taajuuksilla täysin sinimuotoista, jolloin värähtelyn muoto vääristyi ja koostui useammasta harmonisesta taajuuskomponentista. Spektreistä nähdään myös, että anturin mittaukset seurasivat lähes identtisesti pistetaajuuden ja kiihtyvyyden osalta vertailuanturilla mitatun signaalin arvoja.



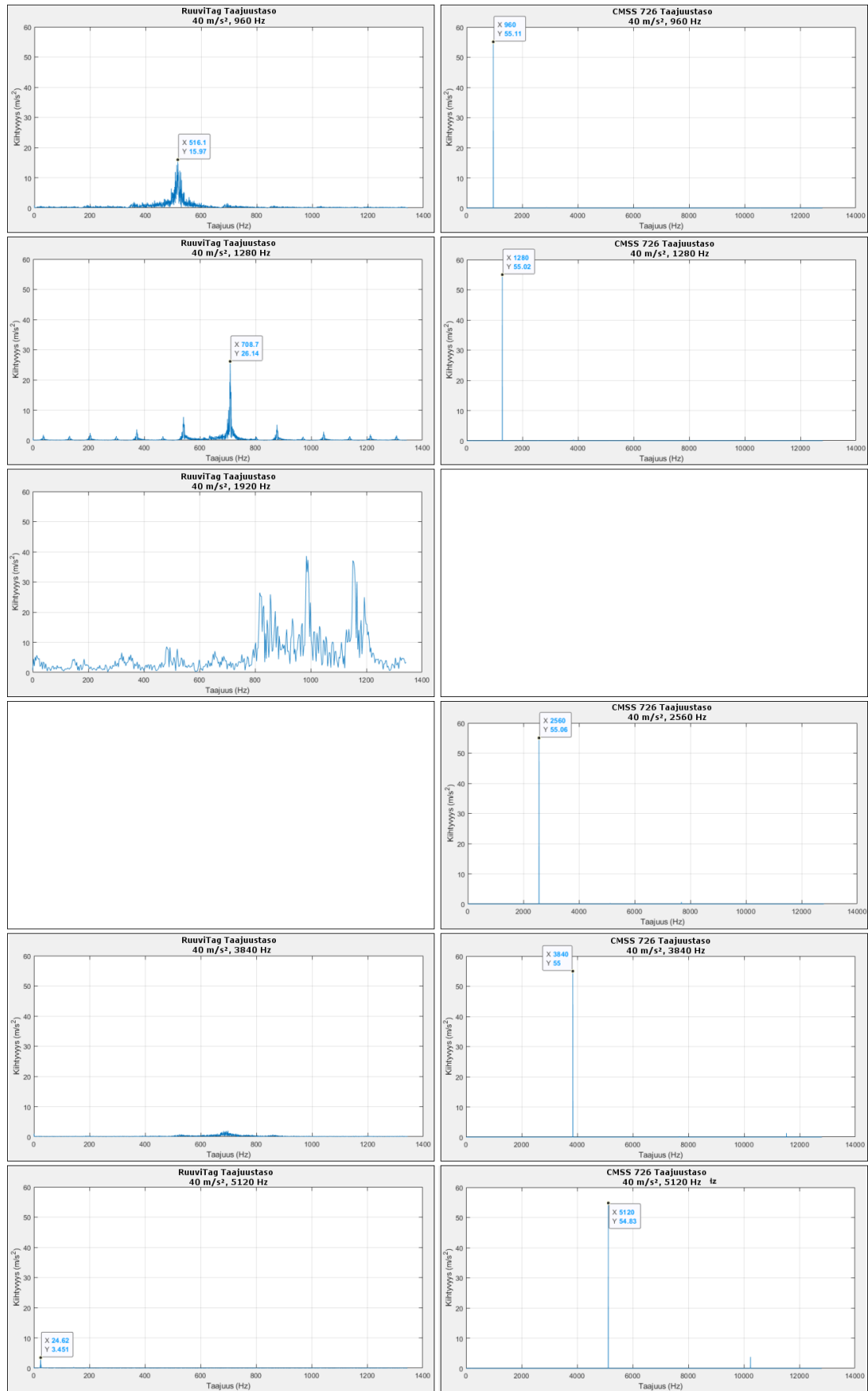
Kuva 38. Mittauksista 1-6 eli taajuuksilla 10, 20, 40, 80, 160 ja 320 Hz mitatut taajuusspektrit. RuuviTagin taajuusspektrit on esitetty vasemmalla puolella ja CMSS 726:n taajuusspektrit on esitetty oikealla puolella.



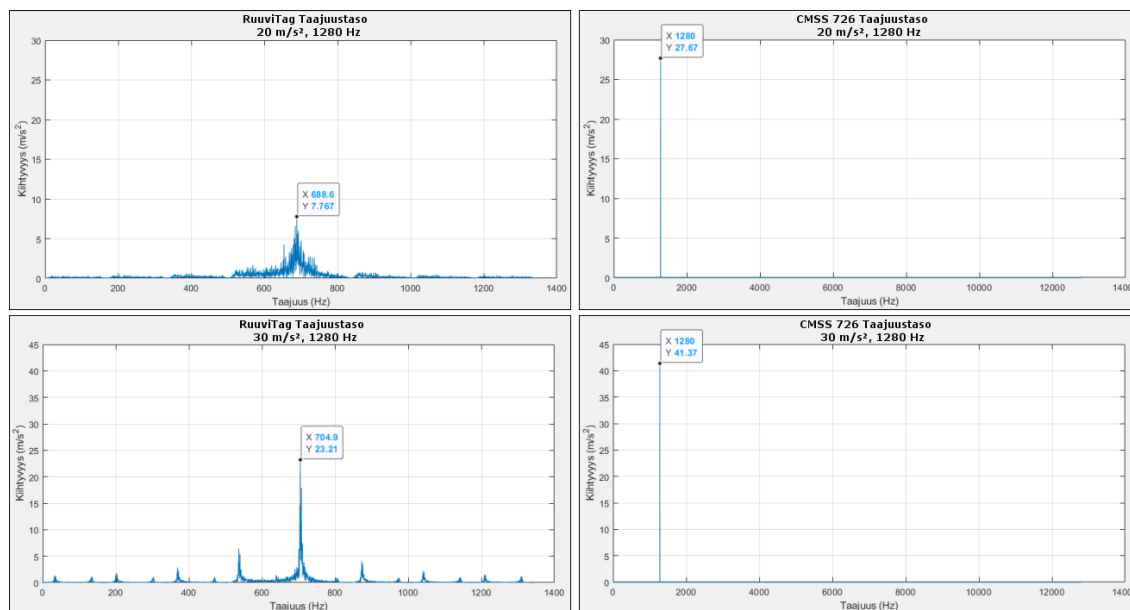
Kuva 39. Mittauksista 7-12 eli taajuuksilla 640, 930, 1280, 1920, 2560 ja 3840 Hz mitatut taajuusspektrit. RuuviTagin taajuusspektrit on esitetty vasemmalla puolella ja CMSS 726:n taajuusspektrit on esitetty oikealla puolella.



Kuva 40. Mittauksista 13-18 eli taajuuksilla 5120, 40, 80, 160, 320 ja 640 Hz mitatut taajuusspektrit. RuuviTagin taajuusspektrit on esitetty vasemmalla puolella ja CMSS 726:n taajuusspektrit on esitetty oikealla puolella.



Kuva 41. Mittauksista 19-24 eli taajuuksilla 960, 1280, 1920, 2560, 3840 ja 5120 Hz mitatut taajuusspektrit. RuuviTagin taajuusspektrit on esitetty vasemmalla puolella ja CMSS 726:n taajuusspektrit on esitetty oikealla puolella.



Kuva 42. Mittauksista 25-26 eli taajuudella 1280 mitatut taajuusspektrit. RuuviTagin taajuusspektrit on esitetty vasemmalla puolella ja CMSS 726:n taajuusspektrit on esitetty oikealla puolella.

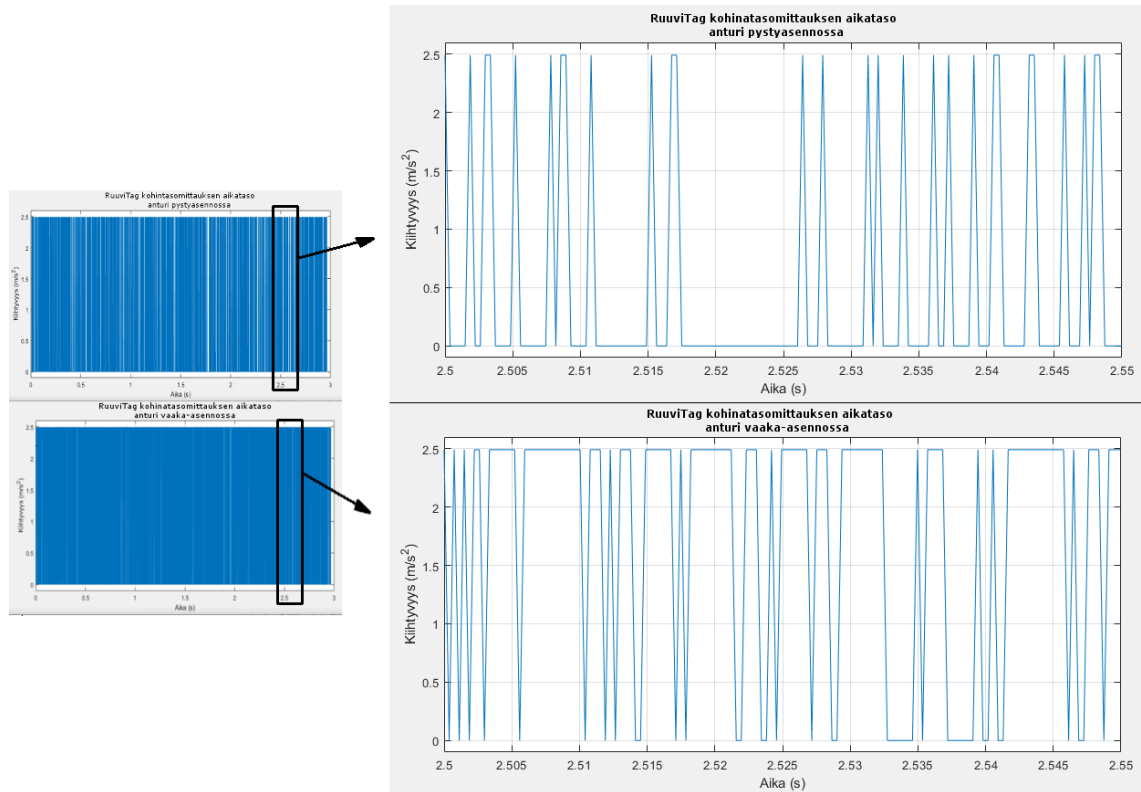
RuuviTagin ja CMSS 726-antureiden taajuusspektrit olivat melko samankaltaiset 80 Hz asti molemmilla kiihtyvyyksillä. Vasta 160 Hz kohdalla antureiden taajuusspektriin muodostui merkittäviä eroavaisuuksia. Kappaleessa 2.7.4 käsiteltiin laskostumista. Nyquistin teoreeman mukaan RuuviTagin näytteenottotaajuuden ollessa 2688 Hz signaalin laskostumisen tulisi ilmetä vasta 1344 Hz eteenpäin. Tämän takia suurimman taajuuskomponentin taajuuden muutoksen syy, täristimen tuottaman värähtelyn taajuuden ollessa 160 ja 320 Hz välillä, ei pitäisi olla laskostumista. Lisäksi vertailuanturin spektrissä ei ollut sellaisia taajuuskomponentteja, jotka voisivat Nyquistin teoreeman mukaisesti kuvautua kyseisille taajuuksille.

8.7 Kohinatasomittausten tulokset

Kaikki RuuviTagin kohinatasomittausten tulokset laskettiin LIS2DH12-kiihtyvyysanturin pystysuuntaisen mittausakselin (z-akselin) mittausdatasta. RuuviTagin kohinatasomittausten skaala oli ± 16 g. Tällöin anturin erottelukyky oli 127,0 mg eli 1.246 m/s^2 .

Tarkasteltaessa kohinatasomittausten aikatasosignaaleja havaittiin, että anturin avulla mitattujen signaalien kiihtyvyys vaihteli kahden arvon 0 ja 2.492 m/s^2 välillä, kuten kuvasta 43 nähdään. Tämä tarkoitti sitä, että anturin kohinatasojen suuruus oli

kaksinkertainen sen erottelukykyyn nähden. Riippuen dynaamisen mittausalueen skaalasta, RuuviTagin signaalin kohina oli amplitudiltaan 0.3114 m/s^2 ($\pm 2 \text{ g}$), 0.6229 m/s^2 ($\pm 4 \text{ g}$), 1.246 m/s^2 ($\pm 8 \text{ g}$) tai 2.492 m/s^2 ($\pm 16 \text{ g}$). RuuviTagin dynaaminen mittausalue, erottelukyky ja kohinan huippuarvot aikatasossa on esitetty taulukossa 7.

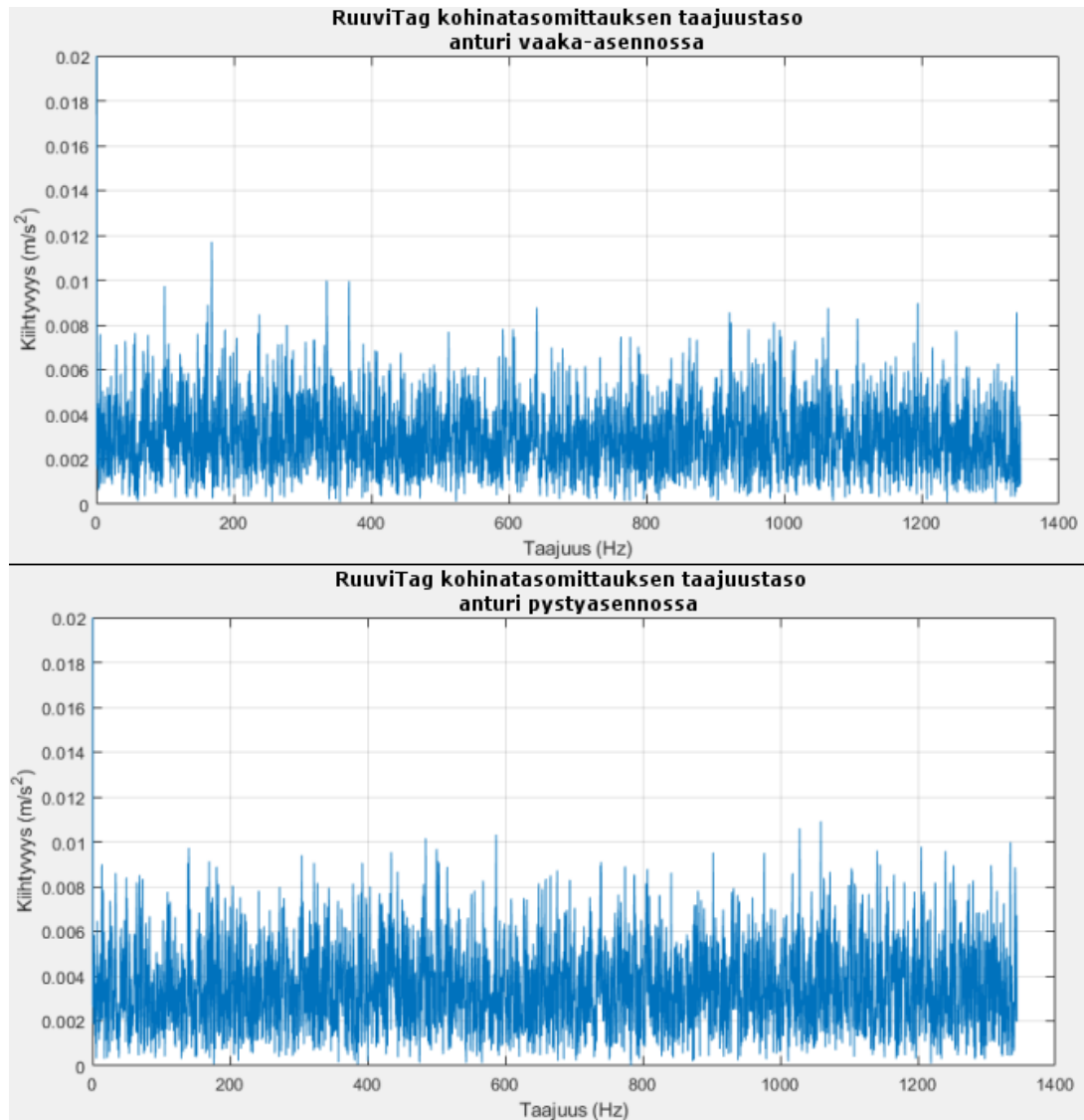


Kuva 43. RuuviTag-anturin kohinasomittaukset esitettynä aikatasossa. Ylhäällä olevassa kuvassa anturi oli pystyasennossa ja alhaalla olevassa kuvassa anturi oli vaaka-asennossa.

Taulukko 7. RuuviTagin dynaaminen mittausalue, erottelukyky ja kohinan huippuarvot aikatasossa.

RuuviTagin dynaaminen mittausalue (g)	RuuviTagin erottelukyky (m/s^2)	RuuviTagin kohinan huippuarvot aikatasossa (m/s^2)
± 2	0.155	0.3114
± 4	0.3114	0.6229
± 8	0.6229	1.246
± 16	1.246	2.492

Kuvassa 44 on esitetty RuuviTagin taajuusspektri ± 2 g dynaamisella mittausalueella. Kuvasta huomataan, että anturin ollessa pysty- tai vaaka-asennossa, kohina oli valkoista kohinaa koko taajuusalueella. Kohinan tehollisarvo oli 0.00533 m/s^2 anturin ollessa pystyasennossa ja 0.00357 m/s^2 anturin ollessa vaaka-asennossa. Tällöin RuuviTagin z-akselin suuntaisen mittaussuunnan spektrissä kohinatiheys oli $543 \text{ } \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ pystyasennossa ja $364 \text{ } \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ vaaka-asennossa. Taulukkoon 8 on listattu RuuviTagin kohinatiheys dynaamisen mittausalueen ollessa ± 2 g.

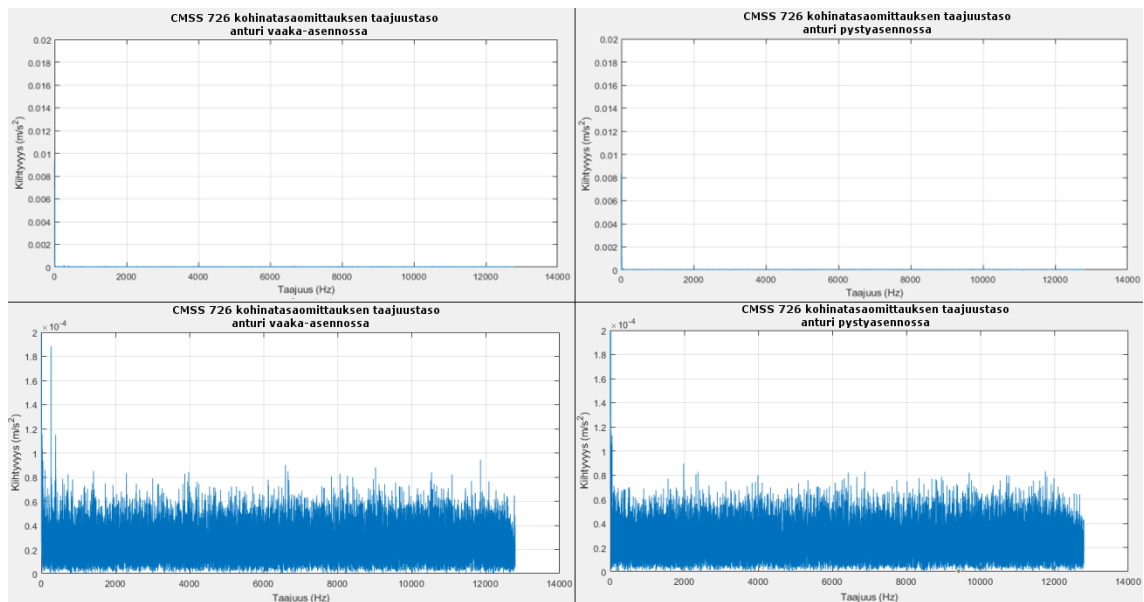


Kuva 44. RuuviTagin kohinatasomittausten spektrit. Ylhäällä olevassa kuvassa anturi oli vaaka-asennossa ja alhaalla olevassa kuvassa anturi oli pystyasennossa.

Taulukko 8. RuuviTagin ja CMSS 726:n kohinatiheys.

Anturi & Suunta	Taajuusspektrin kohinatiheys ($\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)
RuuviTag pystyasento	543
RuuviTag vaaka-asento	364
CMSS 726 pystyasento	5.6
CMSS 726 vaaka-asento	5.9

Kuvassa 45 on esitetty CMSS 726:n kohinatasot. Kuvasta nähdään, että kohina oli valkoista kohinaa koko taajuusalueella. Kohinasignaalin tehollisarvo oli 0.000055 m/s^2 anturin ollessa pystyasennossa ja 0.000058 m/s^2 anturin ollessa vaaka-asennossa. Tällöin CMSS 726:n spektrin kohinatiheys pystysuunnassa oli $5.6 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ja vaakasuunnassa $5.9 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$. Taulukkoon 8 on listattu CMSS 726:n kohinatiheys.

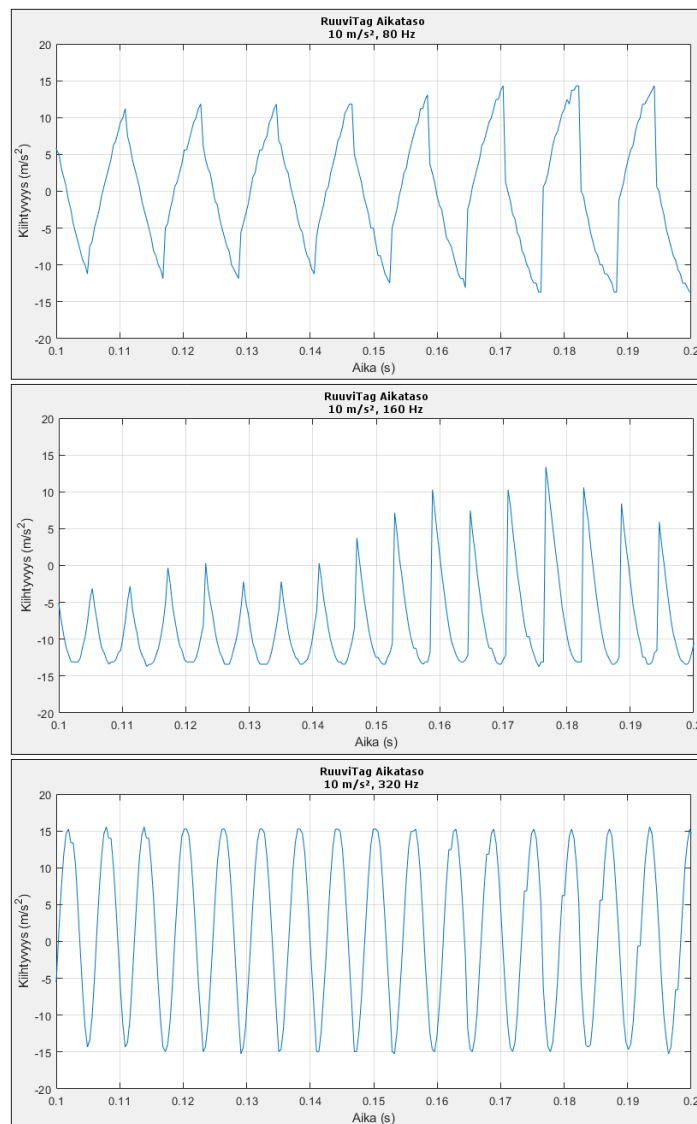


Kuva 45. CMSS 726:n kohinatasomittaukset taajuustasossa. Ylhäällä olevissa spektreissä y-akselin skaala on sama kuin kuvassa 44. Vasemmalla puolella olevissa spektreissä anturin oli mittauksissa vaaka-asennossa ja oikealla puolella olevissa kuvissa anturi oli mittauksissa pystyasennossa.

RuuviTagin ja CMSS 726:n kohinatasojen merkittävin ero oli kohinatasojen suuruus. CMSS 726:n kohinatasot olivat verrattain pieniä RuuviTagiin nähden. Kun RuuviTagin dynaaminen mittausalue oli $\pm 2 \text{ g}$ ja anturin oli pystyasennossa, kohinataso oli noin 97 kertainen ja vaaka-asennossa noin 61 kertainen verrattuna CMSS 726:n kohinatasoihin. RuuviTagin dynaamisen mittausalueen skaalan kasvaessa myös sen kohinatasojen suuruus kasvoi. $\pm 16 \text{ g}$ mittausalueella RuuviTagin kohinataso oli pystyasennossa noin 774 kertainen ja vaaka-asennossa noin 490 kertainen verrattuna CMSS 726:n kohinatasoihin.

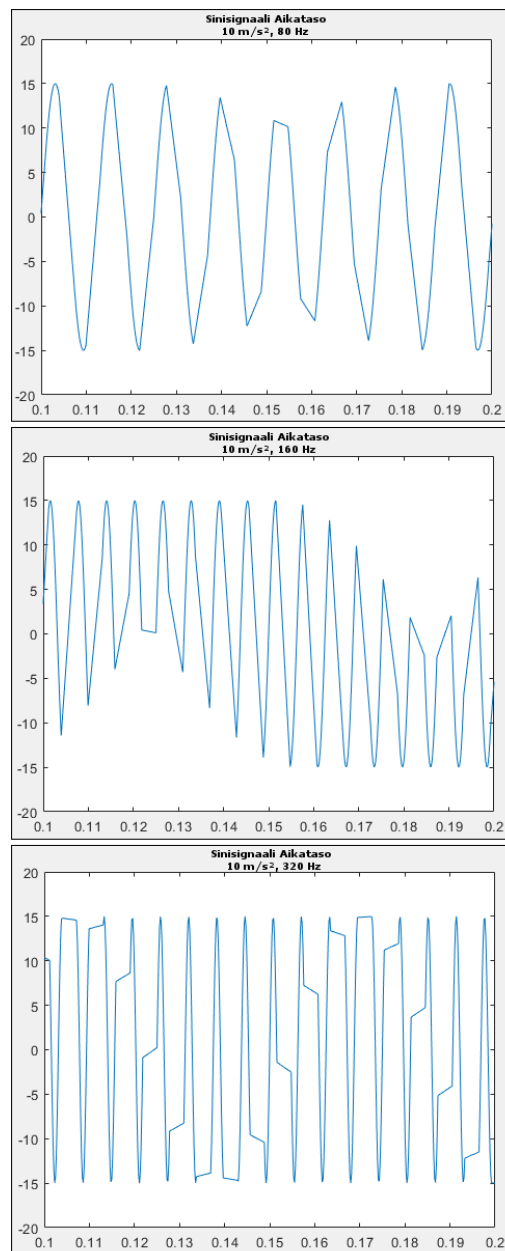
8.8 RuuviTagin avulla mitatun signaalin tarkastelu

Kuvassa 46 on esitetty RuuviTagilla mitatut aikatasosignaalit, kun vertailuanturilla mitattujen kiihtyvyyssignaalin taajuus oli 80, 160 ja 320 Hz ja tehollisarvo 10 m/s^2 . Kuvasta nähdään, että RuuviTagin signaali oli hyvin vaihtelevaa eri mittausten välillä. Jopa yksittäisen mittauksen signaalissa oli huomattavaa vaihtelua. Aikatasosignaalien muotojen vuoksi nousee epäily, että RuuviTagin avulla mitatuissa signaaleissa oli jokin ongelma, joka mahdollisesti johtuu kadonneista näytteistä ja voi aiheuttaa signaalien vääristymistä tai jopa laskostumista.



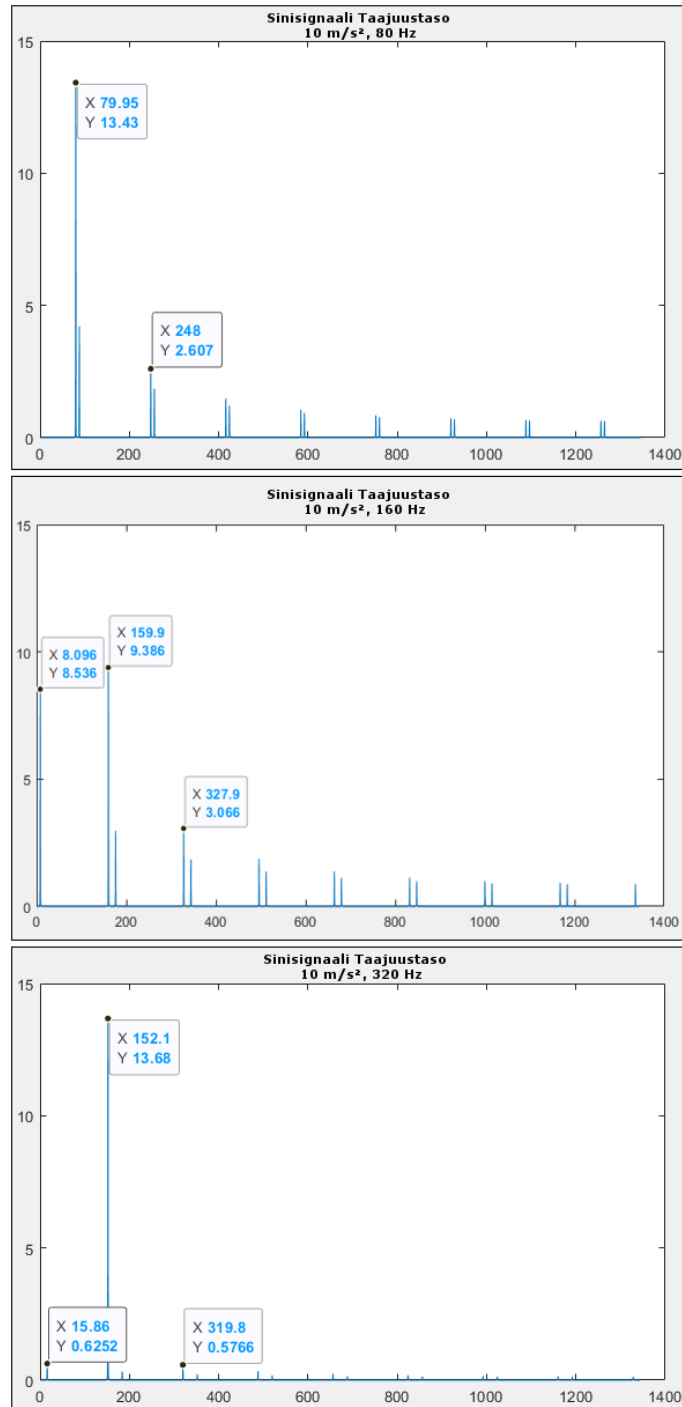
Kuva 46. RuuviTagilla mitatut aikatasosignaalit, kun vertailuanturilla mitattujen kiihtyvyyssignaalin taajuus oli 80, 160 ja 320 Hz ja tehollisarvo 10 m/s^2 .

RuuviTagin signaalin ongelmien tutkimista varten muodostettiin Matlabin avulla laskennallisesti sinisignaali. Signaalin muodostamiseen käytettiin RuuviTagin avulla suoritettujen mittausten tietoja siten, että aluksi halutun taajuisesta sinisignaalista muodostettiin 5389 Hz:n näytteistystaajuudella 16 000 näytteen eli 2,9688 sekunnin pituinen signaali. Tämän jälkeen näytejoukkoa uudelleennäytteistettiin vaihtoehtoisilla tavoilla siten, että lopulliseksi näytemääräksi saatiin 7980 näytettä, kuten RuuviTagin signaaleissakin oli. Kuvassa 47 on esitetty laskennallisesti luotuja signaaleja, jotka on muodostettu siten, että 16 peräkkäisen näytteen jälkeen seuraavat 16 näytettä aina hylättiin. Yhdessä kuvan signaalissa on kokonaisuudessaan 7984 näytettä.



Kuva 47. Laskennallisesti luodut sinisignaalit, joista otettiin 16 perättäistä näytettä, jonka jälkeen seuraavat 16 peräkkäistä näytettä aina hylättiin. Signaalien taajuudet olivat 80, 160 ja 320 Hz. Jokaisen signaalin amplitudi oli 15 m/s^2 .

Kuvien 46 ja 47 aikatasosignaaleissa on havaittavissa samankaltaisuuksia. Tämän lisäksi kuvan 47 signaaleista muodostetut spektrit, jotka näkyvät kuvassa 48, oli hyvin samankaltaisia kuin RuuviTagin taajuusspektrit, jotka käsiteltiin kappaleessa 8.6.4. Esimerkiksi 320 Hz spektrissä näkyi suurimman taajuuskomponentin taajuuden madaltuminen sekä sivunauhojen esiintyminen molemmiin puolin suurimmasta taajuuskomponentista, kuten RuuviTagin spektrissä. Tämä viittasi siihen, että RuuviTagin avulla mitatusta signaalista puuttui useita näytteitä.



Kuva 48. Kuvan 47 aikatasosignaaleista muodostetut taajuusspektrit.

Näytteiden häviäminen mahdollisesti johtui esimerkiksi signaalin näytteistämisestä tai RuuviTagin ohjelmistosta. Lisäksi RuuviTagin signaaliin voi vaikuttaa muun muassa tiedonsiirto. Bluetoothin avulla toteutettu tiedonsiirrosta voi olla ongelmia, kuten datapakettien häviäminen (Rondón ym. 2017). Esimerkiksi puskurin liian pienen koon takia datapaketteja voi hävitä tiedonsiirron aikana (Medhi & Ramasamy 2007, s. 5-6, 202-203). Edellä mainitut tilanteet aiheuttaisivat näytteiden häviämistä, mikä huonontaisi mittausten luotettavuutta.

Vertailuanturin Type 8305S avulla mitattuja taajuusspektrejä tutkittiin eri mittausjärjestelyiden välillä. Tällä pyrittiin varmistamaan, ettei RuuviTagin avulla mitatussa signaalissa ole läsnä esimerkiksi anturin viallisesta kiinnityksestä aiheutuvaa värähtelyä. Vertailuanturi taajuusspektreistä ei löytynyt merkittäviä poikkeamia mittausjärjestelyiden välillä. Tämä viittasi siihen, että RuuviTagin signaalissa esiintyvät poikkeamat olivat aiheutuneet anturin sisäisistä toiminnoista, kuten esimerkiksi näytteiden tallentamisesta tai tiedonsiirrosta.

Jos aikatasosignaalista otettujen näytteiden välinen aika-askel ei pysy vakiona, kuten kuvan 47 signaaleissa, aiheuttaa tämä ongelmia. Näytteistetty signaali voi tällöin vääristyä ja myös laskostumisen mahdollisuus on olemassa. Tämän kaltaisessa tilanteessa ei anturilla suoritettuja mittauksia voida pitää luotettavina ja anturin tuloksiin tulee suhtautua varauksella.

9 KIIHTYVYYSANTUREIDEN EROT

Tässä kappaleessa käydään läpi yksityiskohtaisesti antureiden eroavaisuuksia käyttäen kirjallisuutta, antureiden datalehtisiä sekä muiden tutkijoiden suorittamia kokeita. Tämän lisäksi testimittausten perusteella pyrittiin todentamaan kirjallisuuden väittämät antureiden eroista.

Testimittauksien tuloksia tarkasteltaessa tuli ottaa huomioon antureiden käyttötarkoituksen ja koteloinnin suuri eroavaisuus. Tämän lisäksi tuli huomioida, että tutkittavana oli vain yksi kapasitiivinen MEMS-kiihtyvyysanturi, jolla suoritettiin 28 mittausta. Näin pienen otannan vuoksi testimittausten tulosten perusteella ei voitu tehdä lopullisia yleispäteviä päätelmiä, jotka koskisivat kaikkia kapasitiivisia MEMS-kiihtyvyysantureita. Testimittausten tulokset antoivat suuntaa siitä, mitä edullisilla kapasitiivisilla MEMS-kiihtyvyysantureilla voidaan mahdollisesti tehdä ja mihin käyttötarkoitukseen niitä voidaan käyttää.

9.1 Kirjallisuuden perusteella

Teollisen esineiden internetin kehittymisen seurauksena kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa investoidaan yhä enemmän langattomaan tiedonsiirtoon ja vähävirtaisiin teknologioihin. Kuten kappaleissa 6.2 ja 6.3 tuotiin esille, kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit ovat IIoT:n osalta edellä perinteisiä pietsosähköisiä kiihtyvyysantureita koon, painon, virrankulutuksen ja integroitavuuden kannalta. Lisäksi kapasitiivista MEMS-kiihtyvyysanturia voidaan käyttää mittaamaan todella alhaisia taajuuksia.

Yhtä MEMS-laitetta on mahdollista käyttää mittaamaan useampaa fyysistä ominaisuutta, kuten lämpötilaa, painetta, kiihtyvyyttä ja kosteutta (Kulah & Najafi 2008). Tämän lisäksi kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin tuntoelintä voidaan käyttää mekaanisten suureiden mittaamisen lisäksi sähköisien suureiden mittaamiseen (Varanis ym. 2018, s. 1). Antureilla voi olla analoginen tai digitaalinen lähtö, tai molemmat lähdöt yhtä aikaa. Tämän lisäksi ne kestävät hyvin muuttuvaa lämpötilaa ja niitä voidaan yleensä käyttää -40 - +125 C° lämpötiloissa (Spence 2016).

Kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden käyttöönoton ja omistamisen edullisuuden vuoksi niitä pystytään käyttämään useammissa koneissa ja tehtaissa, lisäten kunnonvalvonnan määrää. MEMS-antureiden valmistuksen mittakaava on yksi suurimmista eroista IEPE-antureihin verrattuna. Kapasitiivisia MEMS-tuntoelimitä voidaan valmistaa suuria määriä yhtä aikaa, mikä vähentää antureiden valmistuskustannuksia huomattavasti. (Gao & Zhang 2004, s. 1)

Kappaleessa 6.3 tuotiin esille mahdollisuus MEMS-kiihtyvyysantureiden integroimisesta yhdelle piirilevylle tai SiP:n sisälle. Integroitavuuden vuoksi anturityyppien välillä on merkittävä ero koon ja painon suhteen.

Kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin itsetestauksen mahdollisuus käsiteltiin kappaleessa 6.2. Kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin itsetestauksen mahdollisuus helpottaa anturissa ilmenevien vikojen havaitsemista verrattuna perinteiseen IEPE-kiihtyvyysanturiin.

Kappaleet 5.1, 5.2, 5.4 ja 6.2 toivat esille anturityyppien taajuusalueisiin ja kohinatasoihin liittyvät asiat. Niiden perusteella kapasitiivisilla MEMS-kiihtyvyysantureilla ei saavuteta yhtä laajoja lineaarisia taajuusalueita tai matalia kohinatasoja kuin IEPE-kiihtyvyysantureilla. Kuitenkin viime vuosien kehityksen ansiosta kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden kohinatasot ovat nykyisin noin $10 - 100 \mu g/\sqrt{Hz}$ luokkaa ja taajuusvasteen lineaarisen alueen yläraja +3 dB tarkkuudella voi ylettyä muutamasta kilohertsistä kymmeneen kilohertsiin asti (Spence 2016). Esimerkiksi vuonna 2017 Analog Devicen julkaisemalla ADXL1001-anturilla on $30 \mu g/\sqrt{Hz}$ kohinataso ja taajuusvaste on +5 % tarkkuudella lineaarinen 4.7 kHz asti. Vuonna 2018 julkaistulla ADXL1005-anturilla on $75 \mu g/\sqrt{Hz}$ kohinataso ja taajuusvaste on +5 % tarkkuudella lineaarinen 9 kHz asti. Lisäksi vuonna 2020 STMicroelectronicsin julkaiseman IIS3DWB-anturin taajuusvaste on +3 dB tarkkuudella lineaarinen 6 kHz asti ja sen kohinataso on 75 tai $60 \mu g/\sqrt{Hz}$ riippuen anturin käytössä olevista mittaussuunnista. ADXL1001- ja ADXL1005-anturi maksavat noin 30 – 40 €/kpl ja IIS3DWB-anturi noin 9 €/kpl. Antureiden lineaariset taajuusalueet, kohinatasot ja hinnat on listattu taulukkoon 9.

Taulukko 9. Esimerkkejä kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden lineaarisista taajuusalueista, kohinatasoista ja hinnoista.

Valmistaja	Anturimalli	Lineaarinen taajuusalue (kHz)	Kohinataso ($\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)	Hinta (€/kpl)
Analog Devices	ADXL1001	4.7 (+5 %)	30	~30
Analog Devices	ADXL1005	9 (+5 %)	75	~40
STMicroelectronics	IIS3DWB	6 (+3 dB)	60-75	~9

Kappaleessa 5.4 käsiteltiin kuinka IEPE-kiihtyvyysanturin tiedonsiirto kaapeloinnilla mahdollistaa signaalin kuljetuksen pitkiä matkoja ilman kohinan lisääntymistä tai resoluution menetystä. Kaapeloinnin toteuttaminen on kuitenkin työlästä ja kallista, joka korostuu entisestään, kun täytyy valvoa useita koneen osia tai anturit halutaan asentaa jälkikäteen. Koenen ym. (2019) tutkimuksen mukaan kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden ja langattoman tiedonsiirron käyttäminen oli joustava ja kustannustehokas vaihtoehto perinteisen kaapeloidun värähtelymittauksen tilalle.

MEMS-antureiden pienen koon vuoksi ne voidaan tarvittaessa asentaa suoraan pyörivään koneen osaan, esimerkiksi hammaspyörään tai akseliin. Lewickin ym. (2015) kokeessa verrattiin hammaspyörän mukana pyöriviä MEMS-antureita perinteisiin koneen ulkopintaan kiinteästi kiinnitettyihin antureihin. Vaihdelaatikon sisäpuolelle asennetut MEMS-anturit havaitsivat hammaspyörän rikkouman yhtä hyvin tai jopa paremmin kuin vaihdelaatikon ulkopuolelle asennetut IEPE-anturit. Vaikka suoraan pyörivään koneen osaan kiinnitettyjen MEMS-antureiden käyttöä ja hyödyllisyyttä kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa on tutkittu vähän, on siinä mahdollisesti tulevaisuudessa potentiaalia.

Työssä tarkastellun kirjallisuuden perusteella anturityyppien edut ja puutteet on koottu taulukoihin 10 ja 11.

Taulukko 10. IEPE-kiihtyvyysanturin etuja ja puutteita.

Edut	Puutteet
Stabiili laajalla lämpötila-alueella	Monimutkainen valmistaa
Laaja dynaaminen mittausalue	Ei voida käyttää todella matalien taajuuksien mittaamiseen
Laaja lineaarinen taajuusalue	Korkea virrankulutus
Kestävä	
Signaalia voidaan kuljettaa pitkiä matkoja kaapeloinnilla ilman lisääntynyttä kohinaa tai resoluution menetystä	
Pienenhö koko ja paino	

Taulukko 11. Kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin etuja ja puutteita.

Edut	Puutteet
Voidaan käyttää todella matalien taajuuksien mittaamiseen	Taajuusvasteen lineaarinen alue on hyvin rajoittunut korkeilla taajuuksilla
Alhainen virrankulutus	
Integroitavuus	Herkkiä sähkömagneettisille häiriöille
Voi sisältää sisäänrakennetun itsetestauksen	
Stabiili laajalla lämpötila-alueella	Korkeahko kohina
Hyvin pieni koko	
Hyvin kevyt	
Suuret tuotantomäärät johtavat edulliseen valmistukseen	
Voidaan mitata useaa fyysistä ja/tai sähköistä ominaisuutta	

9.2 Testimittauksien perusteella

Testimittauksen tuloksia tarkasteltaessa tuli ottaa huomioon antureiden suuri eroavaisuus hinnassa ja niiden käyttötarkoituksessa. RuuviTagin LIS2DH12-kiihtyvyysanturi on todella edullinen, eikä sitä ole varsinaisesti suunniteltu värähtelymittauksiin vaan suunnan esittämiseen ja iskujen tunnistamiseen. CMSS 726 on huomattavasti kalliimpi ja suunniteltu pienten rakenteiden värähtelymittauksiin. Tämän lisäksi RuuviTagin koteloointi ei ole hermeettisesti suljettu, materiaalina on muovi ja sitä ei ole suunniteltu teolliseen ympäristöön. CMSS 726:n koteloointi on hermeettisesti suljettu, materiaalina on ruostumatonta terästä sekä se on suunniteltu teolliseen ympäristöön ja värähtelymittauksia ajatellen.

Kappaleessa 8.8 analysoitiin RuuviTagin avulla mitattuja signaaleja, koska niissä näytti olevan jokin ongelma. Signaalien analysoinnin perusteella voidaan arvioida, että ongelman syy voi mahdollisesti olla joko näytteistyksessä, tiedonsiirrossa, anturin ohjelmistossa tai näytteiden tallennuksessa. Signaaleissa esiintyvien ongelmien takia RuuviTagin mittauksen tulokset ovat epäluotettavia ja niihin tulee suhtautua varauksella.

Kun tutkitaan suoritettuja testimittauksia ja otetaan samalla huomioon antureiden eroavaisuudet sekä käyttötarkoitus, tulokset viittaavat siihen, että erot antureiden välillä olivat käytännössä saman suuntaiset kuin kirjallisuudessa on esitetty. Kapasitiivisella MEMS-kiihtyvyysanturilla onnistui langaton tiedonsiirto alhaisella virrankulutuksella, pienellä koolla ja kevyellä rakenteella, mutta sen taajuusvasteen lineaarinen alue oli hyvin rajoittunut korkeilla taajuuksilla ja sen kohinatasot olivat huomattavasti korkeammat kuin IEPE-kiihtyvyysantureilla.

Tarkasteltaessa RuuviTagin spektrin taajuuskomponentteja huomattiin, että signaalissa esiintyvien ongelmien vuoksi ne erosivat CMSS 726:n taajuuskomponenteista huomattavasti. Tämä vahvasti viittasi siihen, ettei RuuviTagilla voi luotettavasti suorittaa vianmääritystä käyttäen spektri- tai verhoikäyrämenetelmää. Muun muassa Varaniksen ym. (2018), Lewickinin ym. (2015) sekä Huangin & Chenin (2016) tutkimusten perusteella voitiin kuitenkin todeta, että RuuviTagin avulla mitatuissa signaaleissa näkyvät ongelmat eivät ole yleisiä muissa kapasitiivisissa MEMS-kiihtyvyysantureissa.

Vaikka antureiden taajuusspektreissä oli suuria eroavaisuuksia, pysyi molempien anturityyppien aikatasosignaalien tehollisarvot suhteellisen lähellä toisiaan RuuviTagin ominaistajuuteen asti. Tämä viittasi siihen, että RuuviTag ja sen kaltaiset anturit mahdollisesti soveltuisivat kokonaistasoja mittaaviksi laitteiksi, joita PSK-standardin 5710 (2010, s. 2-3) mukaan käytetään yksinkertaisten vikaantumismekanismien todentamiseen tai koneiden suojaamiseen.

10 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin suorituskyvyn arviointi kunnonvalvonnan värähtelymittauksia käsittelevien PSK-standardien osalta tehtiin pääasiallisesti kirjallisuuskatsauksen perusteella. Samoin periaattein arvioitiin myös sitä, onko MEMS-anturiteknologian käyttöönoton vuoksi tarvetta kehittää jo olemassa olevia tai luoda kokonaan uusia PSK-standardeja. Testimittausten tuloksia hyödynnettiin myös johtopäätöksissä, mutta koska testimittaukset suoritettiin vain yhdellä kapasitiivisella MEMS-kiihtyvyysanturilla useamman sijaan ja mittausten tuloksissa oli epävarmuutta, tulee testimittausten tuloksiin suhtautua varauksella.

10.1 Kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin suorituskyky

Kun tarkastellaan kunnonvalvonnan värähtelymittauksia käsittelevissä PSK-standardeissa kuvattuja kiihtyvyysanturille tarvittavia ominaisuuksia ja verrataan kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden ominaisuuksia niihin, niin voidaan sanoa, että nämä anturit eivät yleensä sovellu absoluuttisen värähtelyn mittaamiseen korkeilla taajuuksilla standardien määrittelemällä tavalla. Pääsääntöisesti ne soveltuvat kuitenkin matalataajuuksien värähtelyjen mittaamiseen. Antureiden taajuusvasteen lineaarinen alue korkeilla taajuuksilla on yleensä rajoittunut sadoista hertseistä korkeintaan pariin tuhanteen hertsiin asti. Antureita, jotka soveltuvat korkeataajuuksien värähtelyjen mittaamiseen on jo markkinoilla, mutta laaja taajuusalue, joka kattaa korkeat taajuudet saavutetaan yleensä jonkin muun ominaisuuden kustannuksella, kuten virrankulutuksen ja valmistuskustannusten kasvulla.

Huollon kannalta kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit ovat helppoja ja edullisia, koska ne ovat vähävirtaisia ja kykenevät tyypillisesti lataamaan käynnistyessään kalibroititietonsa, kuten herkkyyden ja nollapainovoimatasen muistista. Kalibroititietojen lataaminen mahdollisesti vähentää anturin uudelleenkalibroinnin tarvetta sekä lisää anturin avulla suoritettujen mittausten luotettavuutta. Lisäksi kalibroititietojen lataaminen mahdollistaa anturin käyttämisen vuosia yhdessä kohteessa ilman tarvetta sen huoltoon tai kalibrointiin, vähentäen huoltokustannuksia. Tämän lisäksi MEMS-antureiden ja SiP:n edullisuuden vuoksi niiden korvaamiskustannukset ovat huomattavasti alhaisemmat kuin perinteisillä IEPE-kiihtyvyysantureilla.

PSK-standardien määrittelemien tarpeellisten ominaisuuksien osalta kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit voivat täyttää tekniset ominaisuudet kuten tiedonsiirtoyhteyden, -ominaisuudet, analysointiominaisuudet sekä signaalin esi- ja jälkikäsitteilyn. Antureilla ei yleensä itsessään ole näitä ominaisuuksia, mutta integroitavuuden ansiosta niiden lisääminen on mahdollista. Lisäksi kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit ovat ympäristöolosuhteiden, kuten koon, lämpötilan vaikutuksen, koteloinnin ja iskunsietokyvyn näkökulmasta soveltuvia kunnonvalvonnan värähtelymittauksiin PSK-standardien esittämien vaatimuksien osalta.

PSK-standardin 5710 (2010) mukaisesti, kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit täyttävät mittalaitetyypin 1 eli kokonaistasoja mittaavien laitteiden vaatimukset. Tyypin 1 mittalaitetta voidaan käyttää yksinkertaisten vikaantumismekanismien todentamiseen ja koneen suojaamiseen. Nämä voivat esimerkiksi sisältää pumpun, puhaltimen, sähkömoottorin, telan tai vaihteen värähtelymittauksen mittaamisen.

Kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit soveltuvat ainakin kokonaistaso-, tunnusluku ja aikatasovalvontaan. Testimittausten perusteella spektri- tai verhoikäyrävalvontaan RuuviTagin kaltaisia laitteita ei suositella käyttämään, koska taajuustason sisältö poikkeaa huomattavasti todellisista arvoista. Ei ole kuitenkaan mitään syytä epäillä, että ominaisuuksiltaan värähtelymittauksiin soveltuvampi kapasitiivinen MEMS-kiihtyvyysanturi ei soveltuisi spektri- ja verhoikäyrävalvontaan.

10.2 MEMS-anturiteknologian vaikutus kunnonvalvonnan värähtelymittausten standardeihin

Kunnonvalvonnan värähtelymittausten osalta MEMS-anturiteknologia luo tarpeen standardisoida järjestelmien ja laitteiden tiedonsiirron ja -tallentamisen. Verkkostandardisointi, tukiasemat, tietoturva sekä tiedonkäsittely ja -tallennus tulevat olemaan standardisoinnin kannalta erittäin tärkeitä, koska edullinen ja langaton kunnonvalvonta luo uudenlaisia valvontamahdollisuuksia koneille, joille se ei ole ennen ollut mahdollista tai kannattavaa.

Antureiden ja mittauspisteiden lisääntyessä kunnonvalvonnan tuottama datan määrä kasvaa huomattavasti. Datan määrän kasvaminen synnyttää ongelman siitä, minkä tiedon tutkiminen ja tallentaminen on kunnonvalvonnan osalta tärkeää ja kannattavaa. Tämän lisäksi langattoman tietoliikenteen esteetön kulkeutuminen teollisuusympäristön

häiriötekijöiden kuten esimerkiksi koneiden, seinien ja sähköverkkojen ohi siten, että data säilyy vahingoittumattomana, tulee huomioida standardisoinnissa.

MEMS-antureiden kalibrointi kunnonvalvonnan värähtelymittauksia varten on tärkeää, koska suorituskyvyn varmistaminen on oleellista luotettavien mittausten ja diagnoosien tekemisen kannalta. Testimittausten perusteella kalibroinnin tärkeys korostui entisestään. MEMS-mittalaitteiden kalibroinnin ja testauksen sekä niiden standardisoinnin tulisi kattaa kiihtyvyysanturin lisäksi koko mittausjärjestelmä. On tärkeää tietää, miten kiihtyvyysanturiin integroidut ja liitetyt osat vaikuttavat värähtelymittausten laatuun ja luotettavuuteen. Tämä on erityisen tärkeää, sillä makroskooppisessa mittakaavassa ilmiöt eivät välttämättä tapahdu täsmälleen samankaltaisesti mikroskooppisessa mittakaavassa (Beeby ym. 2004, s. 3-4). Lisäksi kalibroinnilla ja testauksella on mahdollista varmistaa tuntoelimen tai anturin kiinnityksen onnistuminen.

Antureiden ja erityisesti MEMS-antureiden kiinnitys suoraan pyörivään koneen osaan tulee mahdollisesti olemaan yksi lähitulevaisuuden standardisoimisen kohde kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa. Anturin asennus suoraan pyörivään koneen osaan asettaa anturin painon, koon ja ominaisuuksien osalta rajoitteita, jotta anturin vaikutus kohteen toimintaan tai värähtelyominaisuuksiin olisi mahdollisimman minimaalinen samalla säilyttäen mittausten luotettavuuden.

MEMS-anturiteknologian standardisointi kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa ei vaadi suuria muutoksia jo olemassa oleviin standardeihin, lukuun ottamatta mahdollista anturin asennusta suoraan pyörivään koneen osaan. Jo olemassa olevat standardit kattavat anturin valinnan sekä signaalinkäsittelyn, jotka ovat hyvin samankaltaiset tai identtiset IEPE-teknologian kanssa. Jo olemassa olevien käsitteiden ja määritelmien tulisi tulevaisuudessa kattaa MEMS-anturiteknologian oleellimmat osat, kuten kapasitiivisuuden ja mikroelektromekaaniset järjestelmät. Myös langattoman tiedonsiirron mahdollisuus tulee ilmetä standardeissa, jotka käsittelevät mittaustoiminnan suunnittelua.

11 YHTEENVETO

Diplomityö suoritettiin pääasiallisesti tutkimalla kirjallisuutta sekä osin testimittauksen avulla. Testimittauksissa antureille suoritettiin värähtely- ja kohinatasomittauksia. Työn tavoitteena oli selvittää kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden eroavaisuuksia perinteisiin IEPE-kiihtyvyysantureihin verrattuna. Tavoitteena oli myös verrata kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden suorituskkyä kunnonvalvonnan värähtelymittauksia käsittelevien PSK-standardien asettamiin vaatimuksiin. Lisäksi tavoitteena oli selvittää millaisia tarpeita MEMS-anturitekhnologia synnyttää uusien PSK-standardien luomiselle tai jo olemassa olevien PSK-standardien muokkaamiselle.

Kirjallisuuskatsauksessa todettiin, että kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit kuluttavat vähemmän virtaa sekä ovat painoltaan kevyempiä ja kooltaan pienempiä kuin perinteiset IEPE-kiihtyvyysanturit. MEMS-kiihtyvyysanturit ovat hyvin integroitavia, joka on yksi keskeinen ominaisuus kiihtyvyysantureiden tai mittalaitteiden langattoman tiedonsiirron toteuttamisessa. Antureilla voi myös olla itsetestausominaisuus, joka helpottaa anturissa ilmenevien vikojen havaitsemista. Tämän lisäksi kapasitiivisia MEMS-kiihtyvyysantureita voidaan käyttää mittaamaan hyvin matalia taajuuksia. Anturit ovat myös edullisia valmistaa ja ne ovat stabiileja laajalla lämpötila-alueella.

Kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden taajuusvasteen lineaarinen alue ei ole yhtä laaja kuin perinteisillä IEPE-kiihtyvyysantureilla. Kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden taajuusvasteen lineaarinen alue korkeilla taajuuksilla on yleensä rajoittunut muutamasta sadasta hertsistä pariin tuhanteen hertsiin asti. Niiden dynaaminen mittausalue on pienempi sekä kohinatasot ovat korkeammat verrattuna perinteisiin IEPE-kiihtyvyysantureihin. Tämän lisäksi kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit ovat herkempiä sähkömagneettisille häiriöille.

Testimittauksen tulokset tukivat osittain sitä käsitystä, joka kirjallisuuskatsauksen perusteella näiden anturityyppien eroista saatiin. Testatun MEMS-kiihtyvyysanturin lineaarinen alue oli hyvin rajoittunut korkeilla taajuuksilla ja anturin kohinataso oli korkea.

Testimittauksissa käytetyn kapasitiivisen MEMS-kiihtyvyysanturin signaalien analysoinnin yhteydessä havaittiin, että anturin avulla mitatuissa signaaleissa esiintyi ongelmia ja niihin tuli suhtautua varauksella. Signaalien analysoinnin perusteella voidaan arvioida, että signaaleissa esiintyvät ongelmat mahdollisesti aiheutuivat joko näytteistämisestä, tiedonsiirrosta, anturin ohjelmistosta tai näytteiden tallentamisesta. Edellä mainitut ongelmat voivat vääristää näytteistetyn signaalin ja mahdollisesti aiheuttaa myös signaalin laskostumisen. Muiden tässä työssä tarkasteltujen tutkimusten perusteella tämän kaltaiset signaaleissa esiintyvät ongelmat ovat poikkeuksellisia kapasitiivisille MEMS-kiihtyvyysantureille.

Tässä työssä saadut tulokset viittaavat siihen, että värähtelymittauksiin suunnitellut kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit täyttävät useimmiten PSK-standardien 5706 ja 5710 mukaisen mittalaitetyypin 1 vaatimukset. Tämä tarkoittaa, että antureita voidaan käyttää edullisena vaihtoehtona kiinteällä kiinnityksellä koneisiin, joissa vikaantumismekanismien todentaminen ja koneen suojaaminen ei ole muuten kannattavaa. Kirjallisuusselvityksen tulosten perusteella osa värähtelymittauksiin suunnitelluista kapasitiivisista MEMS-kiihtyvyysantureista voi täyttää mittalaitetyyppien 3 ja 4 vaatimukset. Mittalaitetyypin 3 mittalaitteessa on asetettava taajuusalue, jonka lisäksi anturin avulla mitattu värähtely voidaan esittää aika- ja taajuustasossa. Tämän lisäksi mittalaitetyypin 3 mittalaitteella voidaan esittää koneesta mitattu värähtely PSK-standardin 5706 mukaisilla tunnusluvuilla, kuten esimerkiksi taajuusspektristä valitun taajuuskaistan tehollisarvona. Mittalaitetyypin 4 mittalaite kykenee tekemään vianmäärityksen ja mahdollisesti ennusteen koneen jäljellä olevasta turvallisesta käyttöajasta.

Useat värähtelymittauksiin suunnitellut kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit täyttävät joiltain osin suorituskyvyltään kunnonvalvonnan värähtelymittauksia käsittelevien PSK-standardien asettamat vaatimukset. Anturit eivät yleensä sovellu absoluuttisen värähtelyn mittaamiseen korkeilla taajuuksilla PSK-standardien määrittelemillä tavoilla. Pääsääntöisesti kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit soveltuvat kuitenkin matalataajuisen värähtelyjen mittaamiseen. Muuten nämä anturit voivat täyttää PSK-standardien asettamat ympäristöolosuhteiden, huollon, käytön ja teknisten ominaisuuksien vaatimukset. Lisäksi kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit kykenevät tyypillisesti lataamaan herkkyuden ja nollapainovoimatason tehdaskalibrointiartvot

muististansa rekisteriin aina käynnistyksen yhteydessä, joka vähentää niiden uudelleenkalibroinnin tarvetta.

MEMS-anturiteknologian synnyttämä tarve uusien PSK-standardien luomiselle tulee todennäköisesti liittymään suurelta osin mittausdatan tallentamiseen sekä siirtämiseen langattomasti. Myös mittalaittekokonaisuuksien testaamisen ja kalibroinnin standardisoinnin tarve korostuu, koska mikroskooppisessa mittakaavassa ilmiöt eivät välttämättä tapahdu samankaltaisesti kuin makroskooppisessa mittakaavassa. Työssä suoritettut testimittaukset korostivat entisestään mittalaitteiden kalibroinnin ja testauksen tarvetta. Tämän lisäksi MEMS-anturiteknologia mahdollistaa antureiden kiinnittämisen suoraan pyörivään koneen osaan. Tämä asettaa anturin painon, koon ja ominaisuuksien osalta rajoitteita, jotta anturin vaikutus mitattavan kohteen toimintaan tai värähtelyominaisuuksiin olisi mahdollisimman minimaalinen samalla säilyttäen mittausten luotettavuuden.

Jo olemassa olevien kunnonvalvonnan värähtelymittauksia käsittelevien PSK-standardien muuttamisen tarpeet MEMS-anturiteknologian vuoksi eivät luultavasti ole kovin suuria. Tämä johtuu suurimmilta osin siitä, että jo olemassa olevia standardeja pystytään soveltamaan lähes täysin MEMS-anturiteknologian kanssa. Nykyisten standardien muuttaminen tulee sisältämään MEMS-anturiteknologian käsitteiden ja määritelmien lisäämisen ja tarkentamisen. Lisäksi langattoman tiedonsiirron mahdollisuuden esille tuominen kunnonvalvonnan värähtelymittaustoiminnan suunnittelussa on oleellista.

Mitä todennäköisimmin kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit eivät tule korvaamaan kaikkia IEPE-kiihtyvyysantureita. Tästä huolimatta kapasitiiviset MEMS-kiihtyvyysanturit mahdollistavat kunnonvalvonnan kohteissa, joissa se ei ole ollut kannattava sijoitus aikaisemmin. Tämän mahdollistaa kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden valmistuksen edullisuuden ja suorituskyvyn hyvä suhde. Kapasitiivisten MEMS-kiihtyvyysantureiden lukuisista hyödyistä huolimatta niiden laajamittainen käyttö kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa vaatii vielä lisää tutkimusta, ennen kuin niiden suorituskyvyn voidaan varmuudella todeta vastaavan kunnonvalvonnan värähtelymittauksia käsittelevien PSK-standardien asettamia vaatimuksia.

LÄHDELUETTELO

- ABB Oy, 2007. TTT-käsikirja 2000-07, luku 23: kunnonvalvonta ja huolto [verkkodokumentti]. Helsinki: ABB Oy. Saatavissa: http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/23_Kunnonvalvonta%20ja%20huolto.pdf [viitattu 20.06.2020].
- Angelo M., 1987. Technical Review No. 1: Vibration monitoring of machines. Nærum: Brüel & Kjær, 36 s.
- Bao W., Zhou R., Yang J., Yu D. & Li N., 2009. Anti-aliasing lifting scheme for mechanical vibration fault feature extraction. Mechanical systems and signal processing, 23 (5), S. 1458-1473.
- Beeby S., Ensell G., Kraft M. & White N., 2004. MEMS: mechanical sensors. Norwood: Artech house, 270 s. ISBN 1-58053-536-4.
- Brüel & Kjær, 2020. Accelerometers, Type 8305 [verkkodokumentti]. Nærum: Hottinger Brüel & Kjær A/S. Saatavissa: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/accelerometers/8305> [viitattu 15.9.2020].
- Brüel & Kjær, 2020. Charge signal conditioners, Type 2692-C [verkkodokumentti]. Nærum: Hottinger Brüel & Kjær A/S. Saatavissa: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/conditioning/charge/2692-C> [viitattu 15.9.2020].
- Brüel & Kjær, 2020. Exciter amplifiers, power amplifier type 2718 [verkkodokumentti]. Nærum: Hottinger Brüel & Kjær A/S. Saatavissa: <https://www.bksv.com/en/products/shakers-and-excitors/linear-and-digital-switching-amplifiers/amplifiers-for-modal-and-measurement-excitors/power-amplifier-type-2718> [viitattu 15.9.2020].

Brüel & Kjær, 2020. Measurement exciters, mini-shaker Type 4810 [verkkodokumentti].
 Nærum: Hottinger Brüel & Kjær A/S. Saatavissa:
<https://www.bksv.com/en/products/shakers-and-excitors/measurement-excitors/mini-shaker-type-4810> [viitattu 15.9.2020].

CEN-CENELEC, 2020. Tools for researchers, the importance of standards [verkkodokumentti]. Brussels: CEN-CENELEC management centre. Saatavissa:
<https://www.cencenelec.eu/research/tools/ImportanceENS/Pages/default.aspx> [viitattu 29.06.2020].

Coble J. B., 2010. Merging data sources to predict remaining useful life – an automated method to identify prognostic parameters [verkkodokumentti]. Tennessee: University of Tennessee. Saatavissa: https://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/683/ [viitattu 27.10.2020].

Collacott R. A., 1977. Mechanical fault diagnosis and condition monitoring. London: Chapman and Hall, 496 s. ISBN 0-412-12930-2.

Dargie W. & Poellabauer C., 2010. Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 336 s. ISBN 978-0-470-99765-9.

De Carvalho J. M., Gurjão E. C., Veloso L. R. & Regis C. D. M., 2019. Digital signal processing. New York: Momentum press, 143 s. ISBN 1-947083-91-0.

Edalatfar F., Yaghootkar B., Qureshi A. Q. A., Azimi S. & Bahreyni B., 2016. Design, fabrication and characterization of a high performance MEMS accelerometer. Teoksessa: 2016 IEEE SENSORS. Piscataway: Institute of electrical and electronics engineers, 1-3 s. ISBN 978-1-4799-8287-5.

Elies S., 2015. Performance analysis of commercial accelerometers: a parameter review. Sensors & Transducers, 193 (10), S. 179-190.

Fleming A. J. & Moheimani S. O. R., 2006. Piezoelectric transducers for vibration control and damping. London: Springer science & business media, 271 s. ISBN-13: 9781846283314.

Fraden J., 2016. Handbook of modern sensors: physics, designs and applications. Chem: Springer international publishing, 758 s. ISBN 978-3-319-19303-8.

Gao R. & Zhang L., 2004. Micromachined microsensors for manufacturing. IEEE instrumentation and measurement magazine, 7 (2), S. 20-26.

Girdhar P. & Scheffer C., 2004. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance. Burlington: Newnes, 255 s. ISBN 0-7506-6275-1.

Gupta K. N., 1997. Sāadhanā, Vol. 22, Part 3: Vibration – A tool for machine diagnostics and condition monitoring. India: Indian academy of sciences. ISSN 0256-2499.

Harris C. M. & Piersol A. G., 2002. Harris' shock and vibration handbook. 5. painos. New York: McGraw-Hill education, 1568 s. ISBN 0-07-137081-1.

Huang C.-Y. & Chen J.-H., 2016. Development of dual-axis MEMS accelerometers for machine tools vibration monitoring. Applied sciences, 6 (7), S. 1-9.

IEEE SA, 2020. Develop, develop standards [verkkodokumentti]. Piscataway: IEEE standards association. Saatavissa: <https://standards.ieee.org/develop/develop-standards/overview.html> [viitattu 25.06.2020].

Keysight technologies, 2020. Discontinued function generators, 33120A function / arbitrary waveform generator [verkkodokumentti] Santa Rosa: Keysight technologies, Inc. Saatavissa: <https://www.keysight.com/en/pd-1000001289%3Aepsg%3Apro/function-arbitrary-waveform-generator-15-mhz?cc=FI&lc=fin> [viitattu 25.9.2020].

Koene I., Viitala R. & Kuosmanen P., 2019. Internet of things based monitoring of large rotor vibration with a microelectromechanical systems accelerometer. IEEE Access, 7, S. 92210-92219.

Koistinen J., 2019. Teollisuuden standardisointia 46 vuotta. Helsinki: PSK standardisointi, 18 s.

Korpela J., 2007. Normit, standardit, protokollat, Standardi, mikä se on? [verkkodokumentti]. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa: <http://jkorpela.fi/stand.html> [viitattu 24.06.2020].

Kulah H. & Najafi K., 2008. Energy scavenging from low-frequency vibrations by using frequency up-conversion for wireless sensor applications. *IEEE Sensors Journal* 8 (3), S. 261-268.

Kularatna N., 2003. Digital and analogue instrumentation: testing and measurement. Bodmin: Institution of engineering and technology, 645 s. ISBN 0-85296-999-6.

Law K. H., Lynch J. P. & Wang Y., 2006. Wireless sensing, actuation and control – with applications to civil structures. Teoksessa: *Intelligent computing in engineering and architecture*. Berlin: Springer, 670-689 s. ISBN 978-3-540-46247-7.

Levinzon F., 2015. Piezoelectric accelerometers with integral electronics. Cham: Springer, 180 s. ISBN 978-3-319-08078-9.

Lewicki D. G., Lambert. N. A. & Wagoner R. S., 2015. Evaluation of MEMS-based wireless accelerometer sensor in detecting gear tooth faults in helicopter transmissions. Cleveland: National Aeronautics and Space administration, 40 s.

Looney M., 2014. An introduction to MEMS vibration monitoring. *Analog Dialogue*, 48 (2), S. 3-5.

Medhi D. & Ramasamy K., 2007. Network routing: algorithms, protocols, and architectures. Boston: Morgan Kaufmann publishers, 957 s. ISBN 1-281-00354-9.

Mikkonen H., Miettinen J., Leinonen P., Jantunen E., Kokko V., Riutta E., Sulo P., Komonen K., Lumme V.E., Kautto J., Heinonen K., Lakka S. & Mäkeläinen R., 2009. *Kuntoon perustuva kunnossapito: käsikirja*. Helsinki: KP-Media, 606 s. ISBN 978-952-99458-4-9.

Mills S. R. W., 2010. *Vibration monitoring & analysis handbook*. Northampton: The British institute of non-destructive testing cop., 322 s. ISBN 978-0-903132-39-7.

Mobley R. K., 1999. Vibration fundamentals. Boston: Newnes, 295 s. ISBN 0-7506-7150-5.

Naduvanamani S. & Iyer N. C., 2016. Design and simulation of PZT based MEMS piezoelectric accelerometer. Teoksessa: International conference on electrical, electronics, and optimization techniques. New York: Curran Associates, S. 3715-3721. ISBN 978-1-14973-9939-5.

National instruments, 2020. CompactDAQ chassis, cDAQ-9171 [verkkodokumentti] Austin: National instruments corp. Saatavissa: <https://www.ni.com/fi-fi/support/model.cdaq-9171.html> [viitattu 15.9.2020].

National instruments, 2020. C series sound and vibration input module, NI-9234 [verkkodokumentti] Austin: National instruments corp. Saatavissa: <https://www.ni.com/fi-fi/support/model.ni-9234.html> [viitattu 15.9.2020].

Nohynek P. & Lumme V. E., 2004. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. 2. täydennetty painos. Rajamäki: KP-Media, 146 s. ISBN 951-97101-9-1.

PRIME Faraday Partnership, 2002. An introduction to MEMS. Leicestershire: Loughborough University, 51 s. ISBN 1-84402-020-7.

PSK 5701, 2017. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Käsitteet ja määritelmät. Käytettävät suureet ja mittayksiköt. 8. painos. PSK standardisointiyhdistys ry: 15 s.

PSK 5702, 2007. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittauspisteen valinta ja tunnistaminen. 3. painos. PSK standardisointiyhdistys ry: 4 s.

PSK 5703, 2018. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Anturin, liittimen ja kaapelin valinta sekä asennus. 5. painos. PSK standardisointiyhdistys ry: 9 s.

PSK 5706, 2015. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. Valvontamenetelmät. 4. painos. PSK standardisointiyhdistys ry: 11 s.

PSK 5709, 2004. Kunnonvalvonta. Toiminnan seuranta. Tunnusluvut. 3. painos. PSK standardisointiyhdistys ry: 6 s.

PSK 5710, 2010. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittalaitteiden tyypit ja valinta. 3. painos. PSK standardisointiyhdistys ry: 7 s.

PSK 5721, 2013. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittausasetukset. PSK standardisointiyhdistys ry: 12 s.

PSK 6201, 2011. Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät. 3. painos. PSK standardisointiyhdistys ry: 30 s.

Ramesham R. & Ghaffarian R., 2000. Challenges in interconnection and packaging of microelectromechanical systems (MEMS). Teoksessa: 2000 proceedings. 50th electronic components and technology conference. Piscataway: Institute of electrical and electronics engineers, 666-675 s. ISBN 0-783-5908-9.

Randall R. B., 2011. Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications. Chichester: Wiley-Blackwell, 289 s. ISBN 978-0-470-97765-1.

Rao B. K. N., 1996. Handbook of condition monitoring. 1. painos. Oxford: Elsevier advanced technology, 603 s. ISBN 1-85617-234-1.

Rondón R., Gidlund M. & Landernäs K., 2017. Evaluating Bluetooth low energy suitability for time-crucial industrial IoT applications. International journal of wireless information networks, 24 (3), S. 278-290.

Ruuvi, 2020. About us. [verkkodokumentti] Porvoo: Ruuvi innovations Oy. Saatavissa: <https://ruuvi.com/about-us/> [viitattu 10.7.2020].

Serridge M. & Licht T. R., 1987. Piezoelectric accelerometer and vibration preamplifier handbook. Glostrup: K Larsen & Sen A/S, 151 s.

Sethuramalingam T. K. & Vimalajuliet A., 2010. Design of MEMS based capacitive accelerometer. Teoksessa: International conference on mechanical and electrical technology. Chengdu: Institute of electrical and electronics engineers, 565-568 s. ISBN 978-1-4244-8102-6.

SFS, 2019. Avain standardien maailmaan. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry., 45 s. ISSN 0780-7961;1.

SKF, 2018. SKF vibration sensor catalogue. Lulea: SKF Sweden, 145 s.

SKF, 2020. Wireless systems, SKF Enlight Collect IMx-1. [verkkodokumentti] Lulea: SKF Sweden. Saatavissa: <https://www.skf.com/group/products/condition-monitoring-systems/surveillance-systems/wireless/enlight-collect-imx-1> [viitattu 12.10.2020].

Spence E., 2016. Condition monitoring and MEMS accelerometer – what you need to know. Uptime, June-July 2016, S. 60-61.

Starr A. G., 1997. A structured approach to the selection of condition based maintenance. Teoksessa: Fifth International Conference on factory 2000 – the technology exploitation process. London: Institution of electrical engineers, 131-138 s. ISBN 0-85296-982-2.

STMicroelectronics, 2020. Accelerometers, LIS2DH12. [verkkodokumentti] Geneve: STMicroelectronics International N.V. Saatavissa: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lis2dh12.html> [viitattu 14.8.2020].

Varanis M., Silva A., Mereles A. & Pederiva R., 2018. MEMS accelerometers for mechanical vibration analysis: a comprehensive review with applications. Journal of the Brazilian society of mechanical sciences and engineering, 40 (11), article number 527.

Wang L.-P., Wolf R. A., Wang Y., Deng K. K., Zou L., Davis R. J. & Troler-McKinstry S., 2003. Design, fabrication and measurement of high-sensitivity piezoelectric microelectromechanical systems accelerometers. Journal of microelectromechanical systems, 12 (4), S. 433-439.

Wilcoxon, 2018. Vibration sensor wiring and cabling. Frederick: Wilcoxon sensing technologies, s.8.

Wilson J. S., 2005. Sensor Technology Handbook. Oxford: Newnes, 691 s. ISBN 0-7506-77.

Small diameter accelerometers

CMSS 726

Small diameter, piezoelectric accelerometer

This model is a lightweight piezoelectric accelerometer with integral electronics, designed specifically for measuring vibration on small structures. The unit is hermetically sealed against environmental contamination. The CMSS 726 features a standard output sensitivity of 100 mV/g, a high signal-to-noise ratio and a wide bandwidth.

Features

- For use with the SKF on-line systems, protection systems and the portable data collection instruments
- Meets CE requirements
- Wide frequency range
- Low noise floor
- Temperature compensated
- Wide dynamic range
- Small size, lightweight
- Hermetically sealed

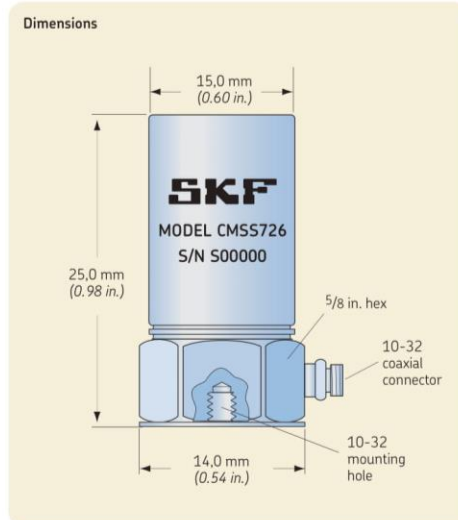
Recommended connector/cable assembly

- CMSS R1-J93-16: Coaxial, high temperature cable with 10-32 connector, 4,8 m (16 ft.)
- CMSS R1-J93-32: Coaxial, high temperature cable with 10-32 connector, 9,7 m (32 ft.)

Specifications

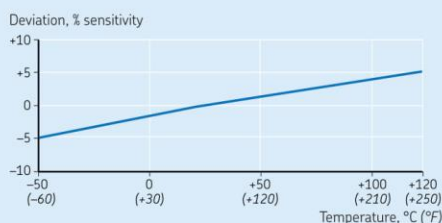
Dynamic

- Sensitivity: 100 mV/g
- Sensitivity precision: $\pm 5\%$ at 25 °C (75 °F)
- Acceleration range: 80 g peak
- Amplitude non-linearity: 1%
- Frequency range:
 - $\pm 5\%$: 2,0 to 10 000 Hz
 - $\pm 10\%$: 1,0 to 12 000 Hz
 - ± 3 dB: 0,6 to 15 000 Hz
- Resonance frequency, mounted, nominal: 132 kHz
- Transverse sensitivity: $\leq 5\%$ of axial
- Temperature response: See graph

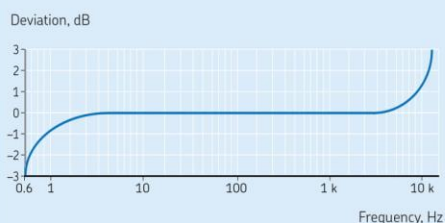


Liite 1 (2). SKF CMSS 726 datalehtinen.

Typical temperature response for accelerometer and AEE sensor



Typical frequency response for accelerometer



Electrical

- Power requirements:
 - Voltage source¹⁾: 18 to 30 V DC
 - Constant current diode^{1), 2)}: 2 to 10 mA
- Electrical noise:
 - Broadband:
 - 2.5 Hz to 25 kHz: 60 µg
 - Spectral:
 - 10 Hz: 8,0 µg/√Hz
 - 100 Hz: 0,8 µg/√Hz
 - 1 000 Hz: 0,3 µg/√Hz
 - 10 000 Hz: 0,2 µg/√Hz
- Output impedance: < 100 Ω
- Bias output voltage: 12 V DC
- Grounding: Case isolated, internally shielded

Environmental

- Temperature range: -50 to +120 °C (-60 to +250 °F) operating temperature
- Vibration limit: 500 g peak
- Shock limit: 5 000 g peak
- Electromagnetic sensitivity, equivalent g, maximum: 40 µg/gauss
- Sealing: Hermetic
- Base strain sensitivity: 0,002 g/µstrain
- CE: According to the generic immunity standard for Industrial Environment EN 50082-2
 - Acceptance criteria: The generated "false equivalent g level" under the above test conditions should be less than 2 mg measured peak to peak

Physical

- Dimensions: See drawing
- Weight: 30 g (1 oz.)
- Case material: 316L stainless steel
- Mounting: 10-32 tapped hole
- Mounting torque: 2,9 Nm (24 in. lbs.)
- Connections:
 - Shell: Common
 - Pin A: Power/Signal
- Mating connector: 10-32 connector
- Recommended cable: Coaxial, high temperature cable

¹⁾ To minimize the possibility of signal distortion when driving long cables with high vibration signals, 24 to 30 V DC powering is recommended. The higher level constant current source should be used when driving long cables (please consult SKF).

²⁾ A maximum current of 6 mA is recommended for operating temperatures in excess of 100 °C (210 °F).

Ordering information

- CMSS 726** Small diameter, piezoelectric accelerometer.
- 10-32 mounting stud provided. A calibration data certificate with the actual sensitivity of the accelerometer is included in each package. The nominal sensitivity is etched on each unit.

Liite 2. RuuviTagin värähtelydatan muokkaamiseen käytetyt ”etsi ja korvaa” -komennot

Etsi	Korvaa	Toiminto
*\(\0x\)(.....)	\$1	Etsitään tekstit jotka alkavat 0x ja joissa on 20 viivalla erotettua merkkiä. Tallennetaan kyseiset 20 tavua ja poistetaan loput
^?(!(.....))*\n		Poistetaan jokainen rivi jossa ei ole 20 viivalla erotettua merkkiä
^?(!(.....))*		Poistetaan riveiltä kaikki paitsi 20 viivalla erotettua merkkiä
<0x0c>		Poistetaan tekstiin jääneet 0x0c-merkit
00-00-F0	Mittaus 1, 2, ...	Nimetään uudestaan 00-00-F0 alkuiset rivit mittausten mukaan
\n(.....)-	\n	Poistetaan F1-otsikko ja indeksi
(.....)-	\$1\n	Jaotellaan kolmen tavun riveihin
-	,	Korvataan viivat pilkulla